

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Aurimas RUTKAUSKAS

MINERALINIŲ PRIEDŲ POVEIKIS
BETONO ATSPARUMUI
ŠARMINEI KOROZIJAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (08T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2018

Disertacija rengta 2014–2018 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

doc. dr. Džigita NAGROCKIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

dr. Valentin ANTONOVIČ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T).

Nariai:

dr. Viktor GRIBNIAK (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T),

prof. dr. Aleksandrs KORJAKINS (Rygos technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T),

doc. dr. Zenonas VALANČIUS (Kauno technologijos universitetas, chemijos inžinerija – 05T),

prof. dr. Juozas VALIVONIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2018 m. gruodžio 14 d. 13 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto Senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel. (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2018 m. lapkričio 13 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2018-046-M mokslo literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-136-2

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2018

© Aurimas Rutkauskas, 2018

aurimas.rutkauskas@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Aurimas RUTKAUSKAS

INFLUENCE OF MINERAL ADDITIVES ON THE RESISTANCE OF CONCRETE TO ALKALI-SILICA REACTION

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MATERIALS ENGINEERING (08T)



LEIDYKLA

Vilnius TECHNIKA 2018

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2014–2018.

Supervisor

Assoc. Prof. Dr Džigita NAGROCKIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Materials Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Dr Valentin ANTONOVIČ (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

Members:

Dr Viktor GRIBNIAK (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T),

Prof. Dr Aleksandrs KORJAKINS (Riga Technical University, Materials Engineering – 08T),

Assoc. Prof. Dr Zenonas VALANČIUS (Kaunas University of Technology, Chemical Engineering – 05T),

Prof. Dr Juozas VALIVONIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Materials Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **1 p. m. on 14 December 2018**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 13 November 2018.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Betono šarminė korozija (BŠK) – viena pavojingiausių betono cheminės korozijos rūšių, kuri lėtai, bet negrįžtamai pažeidžia betonines konstrukcijas. Šarminės korozijos procesai gali sukelti atskirų betoninių konstrukcijų paviršiaus pleišėjimą, išskilinėjimą ir betono suirimą. Viena iš galimybių, siekiant sulėtinti ir sustabdyti šarminę koroziją – betono sudėties modifikavimas mineraliniais ar cheminiais priedais.

Šio darbo tikslas – ištirti aktyviųjų mineralinių priedų poveikį betono šarminėi korozijai naudojant užterštus reaktyviosiomis dalelėmis užpildus, pasiūlyti rekomendacijas, kaip ją mažinti (arba išvengti).

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniamе skyriuje formuluojama problema, darbo aktualumas, darbo tikslas ir uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pateikiamos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje pateikta literatūros analizė. Analizuojamas betono šarminės korozijos mechanizmas ir sąlygos, aptartos ir aprašytos taikomos metodikos betono šarminėi korozijai vertinti. Išsamiai aprašyti naudoti mineraliniai priedai, išanalizuotas jų poveikis betono savybėms eksploatuojant konstrukcijas šarminėje aplinkoje. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje aprašytos tyrimams naudotos medžiagos ir jų pagrindinės charakteristikos. Pateiktos betono mišinių sudėtys, aprašytas betono bandinių formavimas. Išanalizuoti tyrimų metodai ir laboratorinė įranga.

Trečiajame skyriuje analizuojamos mineralinių priedų savybės, betono fizinės ir mechaninės savybės, pateikiami šarminės aplinkos sukeltos betono bandinių plėtros tyrimai, aprašomi mineralinių priedų ir jų kiekio poveikiai betono savybėms ir atsparumui šarminėi korozijai.

Disertacijos tema paskelbti šeši moksliniai straipsniai ir perskaityti penki pranešimai Lietuvos bei kitų šalių konferencijose.

Abstract

Alkali-silica reaction (hereinafter ASR) in concrete is one of the most deleterious types of chemical corrosion that slowly, however irreversibly, damages concrete structures. The processes of Alkali-silica reaction can cause cracking, pop-outs, and destruction of concrete surface. One of the options to slow down and stop Alkali-silica reaction is the modification of concrete mix with mineral admixtures or chemical admixtures.

The aim of this research is to investigate into the effect of mineral admixtures on the ASR in concrete containing aggregates contaminated with reactive particles and to propose recommendations how to reduce (avoid) ASR.

The doctoral thesis consists of the introduction, three chapters, general conclusions, and the lists of literature references and author's publications on the topic of the thesis.

The introductory chapter defines the problem, states the relevance of research, explains the aim and objectives of the research, and describes the research methodology, the scientific novelty of the research, the practical value of research results and thesis statements. The chapter ends with the list of author's publications and conference presentations on the topic of the doctoral thesis and the structure of the thesis.

The first chapter covers the analysis of scientific literature. The analysis of Alkali-silica reaction mechanism is presented and available methodologies used to evaluate Alkali-silica reaction in concrete are described. Mineral admixtures used by other researchers are described and their effect on the characteristics of concrete structures used in ASR favourable environment is analysed. The chapter ends with the formulation of conclusions and specified objectives of the thesis.

The second chapter describes the materials used for experimental tests and their characteristics. Compositions of concrete mixes used in the tests and specimen moulding methods are described. Research methods and laboratory instruments and equipment used are described.

Characteristics of mineral admixtures are described in the third chapter. Physical and mechanical properties of concrete are analysed. Tests of concrete expansion in the alkaline environment are described and analysed. The effect of mineral admixtures and their amount on the properties of concrete and its resistance to Alkali-silica reaction are described.

Six research articles were published and five presentations in scientific conferences in Lithuania and other countries were made on the topic of doctoral thesis.

Žymėjimai

Simboliai

R – koreliacijos koeficientas;

R^2 – determinacijos koeficientas.

Santrumpos

AAR – šarmų ir užpildų reakcija;

ACR – šarmų ir karbonatų reakcija;

ASR – šarmų ir silicio dioksido reakcija;

BŠK – betono šarminė korozija;

FA – lakieji pelenai;

GGBS – aukštakrosnių šlakas;

NDT – neardomieji tyrimų metodai;

NZ – gamtinis ceolitas;

SF – silicio dioksido mikrodulkės;

UIG – ultragarso impulso sklidimo greitis.

Terminai ir apibrėžtys

Mineraliniai priedai – į betono mišinį pridedami smulkūs milteliai arba skysta jų suspensija, kurių paskirtis – užtikrinti tam tikras savybes arba suteikti specialių savybių.

Šarmai – natrio (Na) ir/arba kalio (K) junginiai, kurių daugiausia patenka su cementu, tačiau tik nedideli jų kiekiai. Jie paprastai išreiškiami natrio oksido ekvivalentu, atitinkančiu $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$.

Betono šarminė korozija (BŠK) – šarmų ir užpildų cheminė reakcija skiedinyje ar betone tarp hidroksilo (OH^-) jonų, susidariusių natrio ir kalio šarmų junginiuose, bei užpilduose esančių reaktyviųjų uolienu, kurių gali būti smulkiuosiuose arba stambiuosiuose užpilduose.

Šarminis silicio gelis – reakcijos produktas, kuris susidaro betonuose, kai tam tikri reaktyvieji silicio dioksido /silikatų mineralai ar uolienos reaguoja su šarmais skystojoje porų terpėje ir suformuoja natrio, kalio ir kalcio silikatus. Higroskopiško gelio sudėtis ir plėtimosi charakteristikos skiriasi, atsižvelgiant į porų šarminio tirpalo sudėtį ir gelio amžių.

Šarmų ir silicio dioksido reakcija – reakcija tarp šarminio hidroksido iš portlandcemenčio ir/ar kitų šaltinių ir tam tikrų silikatinių uolienu arba mineralų. Reakcijos produktas, šarminis silicio gelis, gali sukelti destruktinę plėtimąsi ir skilinėjamą eksploatuojamame betone.

Reaktyvieji užpildai – mineralai arba uolienu mineralai, kurie laikomi fiziškai kenkiančiais betonui, mažinančiais jo stiprumą (pvz., skalūninės struktūros mineralai) arba sukeliančiais paviršiaus išskilinėjamą, didinančiais poringumą, taip pat laikomi chemiškai aktyviais (žalingais) ir, vykstant šarminei betono korozijai, sukeliančiais plėtimosi deformacijas.

Plėtra – procesas, kurio metu didėja medžiagos tūris ir matmenys. Kai dėl šarmų ir silicio dioksido reakcijos produktų plėtros sukeltos jėgos viršija betono atsparumą tempimui, jame susidaro įtrūkių ir plyšių.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	3
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	5
 1. MINERALINIŲ PRIEDŲ SAVYBIŲ IR JAIS MODIFIKUOTŲ BETONŲ ATSPARUMO ŠARMINEI KOROZIJAI ANALIZĖ.....	 7
1.1. Betono šarminės korozijos mechanizmas ir sąlygos.....	7
1.2. Taikomų metodikų betono šarminiai korozijai vertinti analizė	11
1.2.1. Paspirtintųjų šarminės korozijos tyrimų metodai.....	11
1.2.2. Aukštos temperatūros šarminės korozijos tyrimo metodai.....	15
1.2.3. Petrografinė analizė	17

1.3. Mineralinių priedų poveikis sukietėjusio betono savybėms	18
1.4. Betono komponentų poveikis šarminiai korozijai	24
1.4.1. Rišamosios medžiagos poveikis	25
1.4.2. Užpildų reaktyvumo įvertinimas	27
1.4.3. Mineralinių priedų poveikis.....	30
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	33
 2. ŽALIAVŲ IR BETONO ŠARMINĖS KOROZIJOS TYRIMŲ METODIKŲ APŽVALGA.....	35
2.1. Naudotos medžiagos.....	35
2.2. Mišinių sudėtys	39
2.3. Betono bandinių formavimas	40
2.4. Tyrimų metodikos	41
2.5. Antrojo skyriaus išvados	43
 3. MINERALINIAIS PRIEDAIS MODIFIKUOTŲ BETONŲ STRUKTŪROS, SAVYBIŲ IR ŠARMINĖS KOROZIJOS TYRIMAI	45
3.1. Mineralinių priedų savybės	45
3.1.1. Mineralinių priedų tankio ir granulometrijos tyrimai	45
3.1.2. Mineralinių priedų struktūros tyrimai	49
3.2. Užpildų reaktyvumo tyrimai.....	53
3.2.1. Žvirgždo užterštumo reaktyviosiomis dalelėmis tyrimai.....	53
3.2.2. Smėlio užterštumo reaktyviosiomis dalelėmis tyrimai	53
3.2.3. Betono su smėliu šarminės korozijos tyrimai	54
3.3. Sudėtinių cementų savybės ir jų poveikis betono šarminiai korozijai	56
3.4. Mineraliniais priedais modifikuotų betonų savybių tyrimai.....	58
3.4.1. Betonų modifikuotų aukštakrosnių šlaku ir lakiisiais pelenais savybių tyrimai	58
3.4.2. Betonų, modifikuotų gamtiniu ceolitu ir silicio dioksido mikrodulkėmis, savybių tyrimai	66
3.5. Mineraliniais priedais modifikuotų betonų šarminės korozijos tyrimai	74
3.5.1. Mineralinių priedų poveikis betono šarminiai korozijai	74
3.5.2. Šarminės korozijos poveikis betono fizikinėms savybėms.....	81
3.5.3. Šarminės korozijos poveikis betono mechaninėms savybėms.....	83
3.5.4. Šarminės korozijos poveikis betono mikrostruktūrai	85
3.5.5. Šarminės korozijos sukeltos betono plėtos grafinė priklausomybė	91
3.5.6. Rekomendacijos betono šarminiai korozijai mažinti	94
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	95
 BENDROSIOS IŠVADOS	97
 LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	99
 AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS .	111

SUMMARY IN ENGLISH.....	113
PRIEDAI ¹	127
A priedas. Cementų fizikinės ir mechaninės savybės.....	128
B priedas. Skystos amorfinio silicio dioksido mikrodulkių suspensijos savybės ...	129
C priedas. Užpildų dalelių ir piltiniai tankiai	130
D priedas. Superplastiklio charakteristikos	131
E priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija	132
F priedas. Bendraa autorių sutikimai teikti publikacijoje skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje	133
G priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	138

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Problem formulation	1
Relevance of the thesis	2
Research object	2
Aim of the thesis	2
Objectives of the thesis.....	2
Research methodology	3
Scientific novelty of the thesis	3
Practical value of the research findings.....	3
Defended statements	4
Approval of the research findings	4
Structure of the thesis	5
 1. THE ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF MINERAL ADMIXTURES AND ALKALI-SILICA REACTION RESISTANCE OF MODIFIED CONCRETES.....	7
1.1. Mechanisms and conditions of alkaline silicate reaction in concrete	7
1.2. Analysis of methodologies used to evaluate the alkaline silicate reaction in concrete	11
1.2.1. Accelerated test methods for Alkali-silica reaction	11
1.2.2. High temperature test methods for Alkali-silica reaction	15

1.2.3. Petrography	17
1.3. The effect of mineral admixtures on the properties of hardened concrete.....	18
1.4. The effect of concrete components on Alkali-silica reaction	24
1.4.1. The effect of cement.....	25
1.4.2. Evaluation of the reactivity of aggregates	27
1.4.3. The effect of mineral admixtures.....	30
1.5. Conclusions of Chapter 1 and formulation of doctoral thesis objectives	33
 2. OVERVIEW OF RESEARCH INTO THE RAW MATERIALS AND ALKALI-SILICA REACTION IN CONCRETE	 35
2.1. Used materials	35
2.2. Compositions of the mixtures.....	39
2.3. Formation of concrete specimens	40
2.4. Research methodology	41
2.5. Conclusions of Chapter 2	43
 3. RESEARCH OF THE STRUCTURE, CHARACTERISTICS AND ALKALI-SILICA REACTION IN CONCRETE MODIFIED WITH MINERAL ADMIXTURES	 45
3.1. Properties of mineral admixtures.....	45
3.1.1. Tests of mineral admixtures density and particle size distribution	45
3.1.2. Tests of mineral admixturesstructure.....	49
3.2. Tests of the reactivity of aggregates	53
3.2.1. Tests of contamination of gravel with reactive particles	53
3.2.2. Tests of contamination of sand with reactive particles	53
3.2.3. Alkali-silica reaction tests in concrete with sand.....	54
3.3. Characteristics of composite cements and their effect on Alkali-silica reaction	56
3.4. Tests of concretes modified with mineral admixtures	58
3.4.1. Studies on the properties of concrete modified blast furnace slag and fly ash.....	58
3.4.2. Studies on the properties of concrete modified with natural zeolite and silica fume.....	66
3.5. Tests of Alkali-silica reaction in concretes modified with mineral admixtures	74
3.5.1. The effect of mineral admixtures on Alkali-silica reaction in concrete.....	74
3.5.2. The effect of Alkali-silica reaction on physical properties of concrete	81
3.5.3. The effect of Alkali-silica reaction on mechanical properties of concrete	83
3.5.4. The effect of Alkali-silica reaction on the microstructure of concrete	85
3.5.5. Dependence of Alkali-silica reaction caused expansion of concrete	91
3.5.6. Recommendations for the reducing Alkali-silica reaction effect in concrete	94
3.6. Conclusions of Chapter 3	95
 GENERAL CONCLUSIONS	 97

REFERENCES	99
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	111
SUMMARY IN ENGLISH.....	113
ANNEXES ²	127
Annex A. Physical and mechanical properties of cements	128
Annex B. Liquid suspension of amorphous silica fume properties	129
Annex C. Aggregate specific and bulk density	130
Annex D. Superplasticizer characteristics	131
Annex E. Author's declaration of integrity	132
Annex F. The co-authors' agreements for providing the materials of the joint publications in the thesis	133
Annex G. Copies of the scientific publications by the author on the topic of the thesis.....	138

² The annexes are supplied in the attached compact disc.

Ivadas

Problemos formulavimas

Užpildų reaktyvumo tyrimai rodo, kad visų telkinių užpilduose yra reaktyviųjų uolienu priemaišų. Todėl, naudojant užpildus betone, prevencinės priemonės, padedančios išvengti žalingos šarmų ir silicio dioksido reakcijos, yra būtinos.

Aktyviųjų mineralinių priedų, tokių kaip lakieji pelenai, aukštakrosnių šlakas, silicio dioksido mikrodulkės bei gamtinis ceolitas, naudojimas betono gamyboje didina atsparumą šarminei korozijai, tačiau svarbu įvertinti karjerų užpildų užterštumo lygį, atsižvelgiant į tai, parinkti mineralinius priedus ir ribinius jų kiekius, nustatyti priedų poveikį medžiagos struktūrai, savybėms ir atsparumui šarminei korozijai.

Betono šarminė korozija (BŠK) – viena iš betono cheminės korozijos rūšių ir vienas iš pavojingiausių reiškinių, galintis sukelti betoninių konstrukcijų pleišėjimą, paviršiaus ištrupėjimą, betono sutrupėjimą. Dėl to rasti tinkamus būdus ją sumažinti ir sukurti betoną, atsparų šarminei korozijai, naudojant užterštus reaktyviosiomis dalelėmis žvyro karjerų užpildus, yra ypač svarbu.

Darbo aktualumas

Betono šarminės korozijos poveikis konstrukcijoms kiekviename pasaulio regione ar net šalyje yra skirtingas. Jis priklauso nuo klimato, vietinių žaliavų savybių ir kitų sudedamųjų betono medžiagų charakteristikų. Todėl betono šarminės korozijos tyrimai dažniausiai atliekami siekiant įvertinti konkretaus regiono sąlygas.

Nesant galimybės išvengti reaktyviosiomis dalelėmis užterštų užpildų betono gamyboje, reikia teisingai parinkti mineralinių priedų kiekius, priklausančius nuo SiO_2 koncentracijos, kurie užtikrins betoninių ar gelžbetoninių konstrukcijų ilgą amžiškumą, patvarumą ir atsparumą šarminei korozijai pavojingomis aplinkos sąlygomis: gana didelei šarmų koncentracijai betono porų tirpale; ribiniam užpildo užterštumui; padidintam vandens kiekiui.

Darbo rezultatai taikytini šarminei korozijai atsparių gelžbetoninių konstrukcijų projektavimui ir padidinto atsparumo šarminei korozijai cementinio betono gamybai.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – padidinto atsparumo šarminei korozijai betonas, modifikuotas mineraliniais priedais: lakiaisiais pelenais, aukštakrosnių šlakais, silicio dioksido mikrodulkėmis ir gamtiniais ceolitais.

Darbo tikslas

Ištirti aktyviųjų mineralinių priedų poveikį betono šarminei korozijai su užterštais reaktyviosiomis dalelėmis užpildais.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Šarminės korozijos atžvilgiu įvertinti sudėtinių cementų poveikį betonui, turinčiam vietinių reaktyviųjų užpildų.
2. Ištirti aktyviųjų mineralinių priedų poveikį betono savybėms ir nustatyti priklausomybę tarp jų kiekio, ultragarso impulso sklidimo greičio pokyčio bei plėtos su užpildais, užterštais reaktyviosiomis dalelėmis.
3. Įvertinti šarminės korozijos proceso poveikį betono struktūrai ir savybėms, bandymų trukmę pratęsiant nuo 14 iki 56 parų.

4. Pateikti rekomendacijas betono šarminei korozijai nustatyti ir mažinti, naudojant mineralinius priedus.

Tyrimų metodika

Užpildų užterštumas reaktyviosiomis uolienomis nustatomas pagal standarto LST 1974:2015 M priedą „Užpildo užterštumo reaktyviosiomis uolienomis ir jų sukeliamų deformacijų nustatymo metodikos“.

Betono savybių tyrimams atlikti buvo taikyti standartizuoti tyrimų metodai, skirti tankiui, gniuždymo ir lenkimo stipriui, ultragarso impulso sklidimo greičiui ir vandens įgerčiai nustatyti.

Betono bandinių atsparumas šarminei korozijai tirtas remiantis modifikuota „RILEM AAR-2“ tyrimų metodika. Metodikos esmė – sukietinti bandiniai 56 paras laikomi 1 M NaOH tirpale, esant 80 °C, periodiškai matuojama jų plėtra.

Betono ir mineralinių priedų struktūrų tyrimams taikyti skenuojančiosios elektroninės mikroskopijos (SEM) ir rentgenografinės analizės metodai.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją gauti šie medžiagų inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Nustatytas mineralinių priedų ir jų kiekio mišinyje poveikis betono plėtrai. Remiantis šiomis žiniomis padidinamas betono atsparumas šarminei korozijai, naudojant užterštus reaktyviosiomis dalelėmis užpildus.
2. Patikslinta „RILEM AAR-2“ tyrimų metodika. Nustatyta, kad, naudojant skirtingus mineralinius priedus, 14 bandymo parų nepakanka betono plėtrai įvertinti, nes iki 14 bandymo parų plėtra kinta tiesine priklausomybe, o tyrimą tęsiant iki 56 parų kreivių charakteristikos pasikeičia priklausomai nuo mineralinio priedo ir jo kiekio.
3. Gautos naujos medžiagų inžinerijos mokslinės žinios leidžia vertinti betono plėtrą, kurią galima nustatyti pagal mineralinių priedų kiekius ir ultragarso impulso sklidimo greičio pokyčius.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Tyrimų rezultatai taikytini rengiant betono šarminės korozijos norminius dokumentus.

Nustatyta priklausomybė tarp lakiųjų pelenų mineralinio priedo kiekio, betono bandinių plėtros ir ultragarso impulso sklidimo greičio pokyčio, paveikus bandinius šarmine aplinka.

Patikslinta „RILEM AAR-2“ tyrimų metodika, kurią naudojant nustatomas mineraliniais priedais modifikuoto betono atsparumas šarminei korozijai.

Ginamieji teiginiai

1. Mineraliniais priedais modifikuoto betono su reaktyviaisiais užpildais šarminės korozijos sukelta plėtra priklauso nuo SiO_2 kiekio mineraliniuose prieduose.
2. Naudojant aktyvius mineralinius priedus, keičiasi betono reaktyviojo užpildo ir cementinio akmens sąlyčio zonos mikrostruktūra bei mažėja reakcijos produkto – šarminio gelio – kiekis.
3. Ryšys tarp ultragarso impulso sklidimo greičio pokyčio, mineralinių priedų kiekio ir plėtros leidžia įvertinti šarminės korozijos poveikį betonui, naudojant užterštus reaktyviosiomis dalelėmis užpildus ir mineralinius priedus.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema išspausdinti šeši moksliniai straipsniai: trys – tarptautinių duomenų bazių leidiniuose (Rutkauskas *et al.* 2015; Rutkauskas *et al.* 2017a; Rutkauskas *et al.* 2017b); vienas – konferencijos straipsnių rinkinyje, įtrauktame į *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazę „Conference Proceedings“ (Rutkauskas *et al.* 2017c); du – konferencijų straipsnių rinkiniuose (Rutkauskas *et al.* 2015; Rutkauskas *et al.* 2016).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai paskelbti penkiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- 3-iojoje tarptautinėje konferencijoje „Innovative Materials, Structures and Technologies“ (IMST 2017) 2017 m. Rygoje;
- 20-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2017 m. Vilniuje;
- 12-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Modern Building Materials, Structures and Techniques“ 2016 m. Vilniuje;
- 19-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2016 m. Vilniuje;
- 18-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2015 m. Vilniuje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros ir šaltinių bei autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašai, santrauka anglų kalba ir septyni priedai.

Darbo apimtis – 127 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 7 numeruotos formulės, 61 paveikslas ir 9 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudotas 151 literatūros šaltinis.

Mineralinių priedų savybių ir jais modifikuotų betonų atsparumo šarminei korozijai analizė

Šiame skyriuje aprašomi betono šarminės korozijos mechanizmas ir sąlygos, kuriomis vyksta betono plėtra. Išanalizuoti plačiausiai naudojami šarminės korozijos nustatymo tyrimo metodai. Aprašomi mineraliniai priedai, jų struktūra, naudojimo galimybės betonuose ir gamyba. Pateikta informacija apie betono sudėties poveikį šarminei korozijai.

Šio skyriaus medžiaga paskelbta dviejuose straipsniuose (Rutkauskas *et al.* 2017a; Rutkauskas ir Nagrockienė 2015) ir pristatyta vienoje mokslinėje konferencijoje.

1.1. Betono šarminės korozijos mechanizmas ir sąlygos

Šiuo metu betonas yra viena labiausiai paplitusių statybinių medžiagų pasaulyje (Naik 2008). Betoną sudaro užpildai, vanduo ir rišamoji medžiaga (cementas ar kitos cementinės medžiagos). Užpildų ir rišamųjų medžiagų reakcijos yra labai sudėtingos. Daugelio natūralių užpildų sudėtyje yra amorfinio silicio dioksido ir

karbonatų, kurie reaguoja su mišinyje esančiais šarmais (Na ir K). Šarmai betono mišinyje atsiranda iš cementinių medžiagų. Ši sąveika plačiai žinoma kaip šarminės korozijos reakcija (angl. *Alkali-Aggregate Reaction*, AAR). Atsižvelgiant į sąveikaujančius mineralus, šarmų ir užpildų reakcijos skirstomos į šarmų ir silicio reakcijas (ASR) ir šarmų karbonatų reakcijas (ACR). Šarminę koroziją sukelia užpildai, kurių sudėtyje yra reaktyviųjų silicio mineralų (Kawabata *et al.* 2013). ACR vyksta dėl užpildų, pavyzdžiui, dolomito atsijų, sudėties. Šarminę koroziją dažniausiai sukelia šarmų ir užpildų tipo reakcijos, o ACR vyksta kur kas rečiau (Ingham 2010).

Šarmų ir silicio reakcija yra viena žalingiausių betone vykstančių reakcijų, dėl kurios betonas plečiasi, atsiranda plyšių, blogėja mechaninės betono savybės ir jo tinkamumas eksploatuoti (Islam 2013).

Šarmų ir silicio reakcijos žala betono mišiniui pastebėta JAV dar 1940 m. ir nuo tada tyrinėjama daugelyje šalių. Nepaisant daugybės paskelbtų tyrimų, reakcijos mechanizmas nėra visiškai aiškus. Mokslininkai nustatė tris pagrindinius šios reakcijos betone veiksnius: šarmai betono porose esančiame tirpale, kai kuriuose užpilduose esantis reaktyvusis amorfinis arba nekristalizuotas silicio dioksidas ir vanduo (Ferraris 1995).

Betono šarminė korozija – mišinyje esančių šarmų ir silikatų reakcijos (ASR) produkto – kalcio hidrosilikato gelio – plėtimosi sukeltas betono struktūros pleišėjimas (Bocullo ir Grinys 2013).

Po daugiau nei 60 metų tyrimų gautos žinios apie reakcijos mechanizmus leido tyrėjams ir technikos komitetams nustatyti taisykles, kurių laikantis galima išvengti naujų šarminės korozijos atvejų (Mather 1999). Deja, vis dar nerasti būdai, kaip sustabdyti reakciją. Pasaulyje yra daug nuo šarminės korozijos nukentėjusių statinių, kurių reguliariam remontui ir prevencinei priežiūrai nuolat reikia lėšų (Poyet *et al.* 2007).

Šarmų ir silicio reakcija yra viena pagrindinių betono kompozicinių medžiagų irimo priežasčių. Mokslininkai tiria, kaip numatyti ir sustabdyti jų irimą.

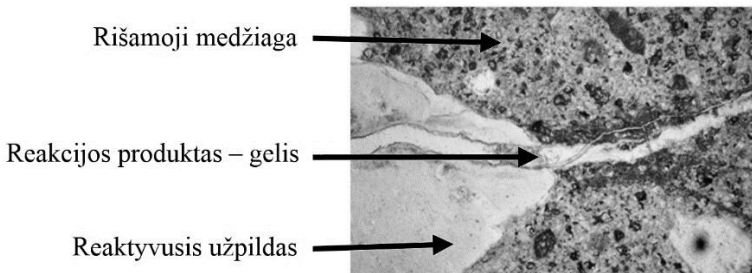
Betono konstrukcijose šarminė korozija gali vykti daugiau nei 25 metus, atsižvelgiant į pagrindinius veiksnius, tokius kaip naudotų užpildų sudėtis (reaktyvumo lygis), drėgmė, temperatūra ir šarmų kiekis betone (Comi *et al.* 2012). Reakcija gali būti labai lėta, o betono konstrukcijos irimo požymiai gali išryškėti tik po dešimtmečio ar net vėliau. Stiprėjanti reakcija gali neigiamai paveikti betono lenkimo stiprį ir tamprumo modulį, nors gniuždymo stipriui ji didelės įtakos neturi (Comi *et al.* 2012).

Betono šarminė korozija yra cheminė reakcija, kurioje dalyvauja betono ar skiedinio porų tirpaluose esančių šarmų katijonai ir hidroksilo jonai bei amorfinės ar suardytos kristalinės būklės silicio dioksidas iš užpildo dalelių (Saouma *et al.* 2006). Šios reakcijos produktas yra gelis, kuris apgaubia užpildo daleles betono

matricoje. Šis gelis matomas kaip tamsi linija aplink užpildą arba balta dėmė pačiame užpilde. Kartais ta balta dėmė pereina į betono matricą (Ballard *et al.* 2008).

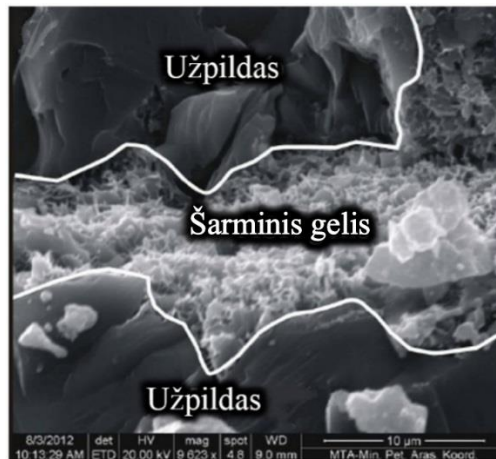
1.1 paveiksle pateikta plono šarminės korozijos paveikto betono sluoksnio petrografinė analizė, atlikta optinės mikroskopijos metodu. Paveiksle matomos kvarcinio smėlio dalelės (kairėje), įsiterpusios į cemento matricą. Silicio dioksido dalelė sureagavo, išsiplėtė ir trūko, o plyšys išplito į gretimą cementinį akmenį. Plyšys užpildė ir cementiniame akmenyje iš dalies užpildytas reakcijos produktu – šarminiu silicio dioksido geliu (Thomas *et al.* 2013).

Susidariusio reakcijos produkto (šarminio gelio) mikrostruktūros nuotrauka pateikta 1.2 paveiksle.



1.1 pav. Plono betono sluoksnio, kuriame vyksta betono šarminė korozija, nuotrauka (matymo laukas 5 mm) (Thomas *et al.* 2013)

Fig. 1.1. Image of a thin section of concrete undergoing Alkali-silica reaction (field of view 5 mm) (Thomas *et al.* 2013)

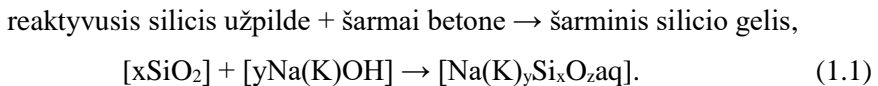


1.2 pav. Šarminės korozijos reakcijos produkto morfologija (Oyan *et al.* 2013)

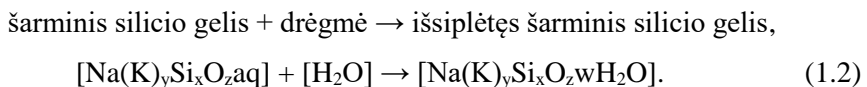
Fig. 1.2. Morphology of Alkali-silica reaction product (Oyan *et al.* 2013)

Šarminės korozijos mechanizmas aprašytas naudojant įvairius modelius (Glasser *et al.* 2015; Poole 1992, Wang *et al.* 1991).

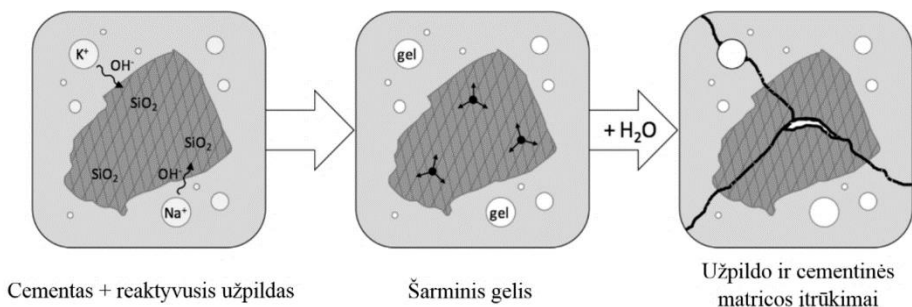
Reakcijos mechanizmą apibūdina du pagrindiniai etapai (Garcia-Diaz *et al.* 2006). Pirmajame etape vyksta cheminė reakcija tarp užpilde esančio reaktyviojo silicio dioksido ir betone esančių šarmų, dėl to susidaro šarminis silicio gelis (Saouma *et al.* 2006):



Antrajame etape šarminis silicio gelis nuo vandens ima plėstis (Saouma *et al.* 2006):



Šie šarminės korozijos reakcijos etapai pateikti 1.3 paveiksle (Clayton *et al.* 2016).



1.3 pav. Šarmų ir silicio reakcijos rezultatas – gelis, kuris gali plėstis ir sukelti betono mikroįtrūkius (Clayton *et al.* 2016)

Fig. 1.3. Alkali-silica reaction product, a gel that can expand and may cause micro – cracks in concrete (Clayton *et al.* 2016)

Gelis ne visada sukelia žalingą šarminę koroziją. Kai kurie geliai plečiasi labai nedaug arba visai nesiplečia. Jei gelis plečiasi nedaug, jis problemų nesukels. Smarkiai besiplečiantys geliai sukuria slėgį, kuris yra didesnis už betono tempiamąjį stiprį, todėl betonas sutrūkinėja. Plėtros slėgio jėgą taip pat didina temperatūra (Farny *et al.* 2007).

Nuo šarminės korozijos masto priklausanti tūrinė plėtra išsamiai išnagrinėta eksperimentiniais ir analitiniais būdais, o tyrimo metodai susisteminti. Kai betoną veikia didelis kiekis gryno vandens, silicio gelį sudarantys natrio ir kalio šarmų

jonai prarandami per betono paviršių. Tokiu būdu betone mažėja silicio gelio kiekis. Nagrinėjant šarminės korozijos sukeltos plėtros mastą manoma, kad šarmių praradimo veiksnys sietinas su reakcijos priežastimi, o ne su įtempiais. Kita vertus, reakcijos rezultatas yra geliai, o jų plėtra ir judėjimas yra labai susiję su įtempiais. Reikia paminėti, kad anksčiau buvo daug kalbama apie didelę šarminės korozijos plėtros anizotropiją dėl įtempių. Akivaizdu, kad abu veiksniai yra susiję su šarminės korozijos sukeltos plėtros mastu.

Šarminės korozijos paveiktos betono konstrukcijos trūkinėja, pasistumia, deformuojasi, trupa, blogėja jų mechaninės savybės. Tai daro neigiamą poveikį konstrukcijų ilgaamžiškumui. Manoma, kad geliai yra pagrindinė betono išsipūtimo ir irimo priežastis.

Pagal LST 1974:2012 standartą Lietuvoje nustatytos trys šarminės korozijos agresyvumo aplinkos. XR0 agresyvumo šarminės korozijos požįriu aplinkoje naudojamo betono mišinio sudėties ribojimų nėra.

XR1 agresyvumo šarminės korozijos požįriu aplinkoje, naudojant betono mišinį su užpildais iš Lietuvos žvyrynų ir su kitų telkinių nereaktyviaisiais stambiaisiais užpildais, Na ir K oksidų, perskaičiavus ekvivalentinį $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$, kiekis CEM I cimente turi būti $\leq 0,8 \%$ (masės), o ekvivalentinis Na ir K oksidų kiekis betono mišinyje neturi viršyti $4,0 \text{ kg/m}^3$.

XR2 agresyvumo šarminės korozijos požįriu aplinkoje, naudojant betono mišinį su užpildais iš Lietuvos žvyrynų ir su kitų telkinių nereaktyviaisiais stambiaisiais užpildais, Na ir K oksidų, perskaičiavus ekvivalentinį $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$, kiekis CEM I cimente turi būti $\leq 0,8 \%$ (masės), o ekvivalentinis Na ir K oksidų kiekis betono mišinyje neturi viršyti $3,0 \text{ kg/m}^3$.

1.2. Taikomų metodikų betono šarminei korozijai vertinti analizė

Šiame poskyryje aprašomi paspartintieji ir aukštos temperatūros šarminės korozijos tyrimų metodai. Jie apima prizmės plėtros matavimą, cheminę bandinių analizę, cheminę autoklavinio vandens mėginių analizę ir autoklavinius betono bandinių tyrimus.

1.2.1. Paspartintųjų šarminės korozijos tyrimų metodai

Yra įvairių būdų, leidžiančių nustatyti, ar betono užpildai gali sukelti betono šarminę koroziją. Mokslininkų straipsniuose aptariami šarminės korozijos tyrimo metodų paaškinimai ir apžvalgos (Chatterji 2005; Wigum *et al.* 1997; Grattan-Bellew 1997; Folliard *et al.* 2006).

Betono tyrimo metodas nustatytas 1950 m. ASTM C227 standartu (ASTM C227-10 2010), parengtu pagal Stantoną (Stanton 1940) atliktus bandymus.

Bandymui naudojamos iš betono skiedinio pagamintos $25 \times 25 \times 285$ mm sijos, metus ar ilgiau laikomos virš vandens 38°C temperatūroje. Bandinių 0,05 % plėtra po 3 mėn. arba 0,10 % po 6 mėn. rodo, ar užpildas yra reaktyvus.

Taikant ASTM C227 tyrimo metodą pirmą kartą buvo aprašytas šarmų išplovimas betone (Blanks *et al.* 1946). Kai kurie tyrimai, atlikti jau priėmus ASTM C227 standartą, parodė, kad jame aprašytu bandymu nepavyksta nustatyti skirtingų tipų reaktyviųjų užpildų (Oberholster 1987; Shayan *et al.* 1992; Ranc *et al.* 1994). Kai kurie autoriai aiškino šio standartinio tyrimo metodo trūkumą tuo, kad jis neapima šarmų išplovimo ir smulkesnių nei 0,15 mm užpildų (Sorrentino *et al.* 1989). ASTM C227 standartas galioja ir dabar, tačiau kai kurie šarminės korozijos tyrėjai rekomenduoja jo nebetaikyti (Hooton 1995).

Cemento ir užpildo junginiams betone analizuoti ir jų rezultatams interpretuoti greta ASTM C227 tyrimo metodo rekomenduojama taikyti ASTM C289 standarte aprašytą tyrimo metodą, kuris vadinamas paspartintuoju cheminiu metodu (1952). Ruošiant mėginius tyrimui ASTM C289 tyrimo metodu, užpildai sumalami ir išsijojami per 0,3 mm sieta. Bandiniams ruošti naudojami užpildai, likę ant 0,15 mm sieto. Išsijotas 25 g mėginys dedamas į 80°C temperatūros 1 M NaOH tirpalą ir laikomas jame 24 val. Po paros apskaičiuojamas NaOH kiekis užpildo grūdeliuose, taip pat ištirpusio silicio dioksido kiekis ir šie kiekiai palyginami tarpusavyje.

Šis tyrimo metodas buvo sukurtas silicio dioksido turintiems užpildams tirti, tačiau jis buvo kritikuojamas dėl tyrimų rezultatų iškraipymo, kuriuos sukelia kiti užpilduose esantys mineralai (Chatterji 2005, Wigum *et al.* 1997). Paskutinė ASTM C289 standarto redakcija paskelbta 2007 m., paskui standartas atšauktas be pakeitimų.

Paspartintasis betono sijos tyrimo metodas (angl. *Accelerated Mortar Bar Test*, AMBT) yra vienas daugiausia tyrinėjamų šarminės betono korozijos nustatymo metodų. Jis aprašytas įvairiuose standartuose, pavyzdžiui, ASTM C 1260, Pietų Afrikos NBRI metode (Oberholster *et al.* 1986), „RILEM AAR-2“ metode (RILEM 2016) ir CSA A23.2-25A. Visi šio tyrimo metodo variantai grindžiami Oberholster ir Davies sukurtu tyrimo metodu (Oberholster *et al.* 1986), skiriasi tik bandymo trukmė ir bandinio plėtros ribos. Pagal ASTM C1260 standartą iš betono skiedinio suformuojamos bent trys $25 \times 25 \times 285$ mm dydžio sijos su atitinkamo dydžio užpildais. 24 val. kietintos drėgnoje aplinkoje sijos išimamos iš formų, išmatuojamas jų pailgėjimas ir įdedamos į vandens vonelę. Vanduo vonelėje pašildomas krosnelėje iki 80°C . Po paros sijos išimamos iš vonelės, išmatuojamas jų pailgėjimas ir pamerkiamos į 80°C temperatūros 1 M NaOH tirpalą. Sijos paliekamos tirpale, o jų ilgis reguliariai matuojamas 14 dienų. Didesnė nei 0,20 % plėtra rodo, kad užpildas galimai yra reaktyvusis. Plėtra tarp 0,10 % ir 0,20 % daugeliu atvejų rodo, kad užpildai nekelia pavojaus betono pažaidoms atsirasti, tačiau tokius užpildus reikia toliau tirti, kol bus patvirtinta, kad jie nėra reaktyvūs.

Paspartintasis betono sijos tyrimo metodas turi du pagrindinius trūkumus: galima ištirti tik užpildų daleles, o tyrimo rezultatai nėra visiškai patikimi. Norint ištirti, ar stambusis užpildas gali sukelti šarminę koroziją, užpildą pirmiausia reikia sumalti. Kadangi iš sumalto užpildo lengviau išsiskiria silicio dioksidas ir pasikeičia užpildo reaktyvumas (Latifee *et al.* 2015), šio tyrimo rezultatai gali klaidinti. Kita vertus, mokslininkai Lu *et al.* (2008) teigia, kad malant iš užpildo gali pašalinti reaktyvūs komponentas, ir bandymo metu nepasireišk reaktyviosios užpildo savybės. Paspartintasis betono sijos tyrimo metodas kritikuojamas ir dėl labai griežtų bandymo sąlygų, dėl kurių galima gauti neteisingus teigiamus rezultatus (Berube *et al.* 1992).

Nepaisant šių trūkumų, paspartintasis betono sijos tyrimo metodas tebėra pirmasis žingsnis nustatant daugelio užpildų galimybę sukelti šarminę koroziją. Thomas *et al.* (Thomas *et al.* 2006) rekomenduoja taikyti šį tyrimo metodą, kai reikia patvirtinti, jog užpildas yra tinkamas, o ne nustatyti, kuris užpildas yra netinkamas.

Betono prizmės tyrimo metodas (angl. *Concrete Prism Test*, CPT) pirmą kartą buvo standartizuotas Kanadoje 1950 m., kur dabar naudojamas kaip CSA A23.2-14A standartas. Šio tyrimo metodą aprašantis standartas 1995 m. Amerikoje buvo parengtas kaip ASTM C1293, o naujausia jo redakcija pasirodė 2015 m. Remiantis „RILEM AAR-3“ standartu (RILEM Recommended Test Method: AAR-3 2016) bandymas atliekamas pagal kiek kitus parametrus, taip pat rekomenduojama kita plėtros riba. Bandymai atliekami su trimis $75 \times 75 \times 285$ mm dydžio betono prizmėmis, turinčiomis vienodą šarmų kiekį, kuris padidinamas į vandenį pridedant 1,25 % NaOH nuo cemento masės. Kietintos vieną parą prizmės išimamos iš formų, išmatuojamas jų pailgėjimas. Paskui prizmės laikomos virš vandens sandariame inde 38°C temperatūroje vienerius metus, kai tiriamas užpildas, sumaišytas su įprastiniu cementu, arba dvejus metus, kai tiriamos šarminės korozijos mažinimo priemonės, užpildus maišant su pagalbinėmis cementinėmis medžiagomis. Kondicionavimo metu matuojamas pailgėjimas. Užpildai laikomi reaktyviais, jei per metus prizmė pailgėja 0,04 %. Atliekant šarminės korozijos nustatymo bandymą, kartu su užpildais naudojamų pagalbinių cementinių medžiagų kiekis laikomas minimaliu betono plėtrą sulaukančiu kiekiu, jei per dvejus metus vidutinis prizmės pailgėjimas yra mažesnis nei 0,04 %.

Betono prizmės tyrimo metodas laikomas patikimiausiu iš visų laboratorinių šarminės korozijos nustatymo tyrimų (Berube *et al.* 1992; Ideker *et al.* 2010). Vis dėlto šis metodas yra nepraktiškas, nes rezultatams gauti reikia daug laiko, todėl buvo ne kartą mėginta šį tyrimo metodą sutrumpinti. Dar daugiau, Rivard *et al.* (Rivard *et al.* 2003) įrodė, kad per šį bandymą iš prizmių išplaunama nuo 12 % iki 25 % šarmų, dėl to prizmių plėtra sulėtėja arba sustoja. Dėl šarmų išplovimo bandymų metu ilgainiui imta naudoti didesnę cemento kiekį ir daugiau $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (1,25 %), lyginant su originalia bandymo versija.

Siekdami sutrumpinti bandymo trukmę, Ranc ir Debray (Ranc and Debray 1992) sukūrė paspartintąją betono prizmės tyrimo metodiką. Paspartintajame tyrime temperatūra paaukštinama iki 60 °C šarminei korozijai paspartinti. Taip sutrumpėja rezultatų gavimo laikas. Paspartintuoju tyrimo metodu bandinių plėtros rezultatai gaunami per 3 mėnesius. Tyrėjų siūlymu dažniausiai naudojama 0,04 % plėtros riba po 13 savaičių.

Iš betono prizmių į vandenį indo dugne išplaunami šarmai yra pagrindinis paspartintojo metodo trūkumas (Ideker *et al.* 2006). Po trijų mėnesių bandymo bandinių plėtra nekinta dėl šarmų išplovimo. Paspartintajame bandyme išplaukama daugiau šarmų, lyginant su standartiniu bandymu.

Xu *et al.* (Xu *et al.* 1998) sukūrė kinų paspartintąjį betono sijos tyrimo metodą (angl. *Chinese Accelerated Mortar Bar Test*, CAMBT), kuriame taikomi kinų autoklavinio ir paspartintojo betono sijos tyrimo metodų privalumai. Metodu tiriamos 40×40×160 mm dydžio sijos iš skiedinio, kurio V/C santykis 0,33, o Na₂O_{eq} yra 1,5 % nuo cemento masės. Į mažai šarmų turintį cementą pridedama kalio hidroksido (KOH). Naudojamas tik vienos frakcijos užpildas, t. y. 0,15–0,80 mm. Pradinis pailgėjimas matuojamas laikius tirpale 4 val., o plėtros rezultatai matuojami kondicionavus 7 dienas.

Kaip ir paspartintojo betono sijos tyrimo metodo atveju, bandinių plėtra, tiriant kinų paspartintuoju betono sijos tyrimo metodu, menkai koreliuoja su plėtra, tiriant betono prizmės tyrimo metodu. Geresni koreliacijos rezultatai gaunami naudojant stambesnės frakcijos užpildą ir matuojant plėtrą po 10 dienų.

Mažos betono prizmės tyrimo metodą (angl. *Miniature Concrete Prism Test*, MCPT) sukūrė Latifee ir Rangaraju (2015), pagal įvairius parametrus išbandę keturis skirtingus reaktyviuosius užpildus ir du nereaktyviuosius užpildus. Bandymui suformuojamos 50×50×285 mm betono prizmės iš šarminio cemento (apie 0,9 % Na₂O_{eq}). Šarmų kiekis padidinamas iki 1,25 % Na₂O_{eq} nuo cemento masės kaip ir betono prizmės tyrimo metodu. Prizmės kietinamos vieną parą drėgmėje, išimamos iš formų ir išmatuojamas jų pailgėjimas. Po to prizmės parai pamerkiamos į 60 °C temperatūros vandenį, išmatuojamas jų ilgis ir pamerkiamos į 1 M NaOH tirpalą. Kondicionuojant pailgėjimas matuojamas reguliariais intervalais iki 84 dienų. Siūloma plėtros riba yra 0,04 % po 56 dienų.

Latifee ir Rangaraju (Latifee and Rangaraju 2015) ištyrė 19 reaktyviųjų ir nereaktyviųjų stambiųjų užpildų ir palygino plėtros duomenis su betono prizmės ir paspartintojo betono sijos tyrimų metodais gautais duomenimis. Pagal mažos betono prizmės tyrimo metodą plėtros po 56 dienų duomenys gerai koreliavo su vienu metų betono prizmės tyrimų duomenimis, bet blogai koreliavo su paspartintojo betono sijos metodo duomenimis. Kitu tyrimu (Latifee *et al.* 2015) nustatyta, kad mažos betono prizmės ir paspartintojo betono prizmės tyrimų metodikų rezultatai bei betono realioje aplinkoje tyrimų duomenys sutapo, todėl mažos betono prizmės tyrimo metodika buvo siūloma kaip gera alternatyva betono prizmės

ir paspartintajai betono sijos tyrimų metodikoms. Mažos betono prizmės tyrimo metodika dar nėra sulaukusi didelės kritikos mokslinėje literatūroje ir pagal ją gaunami tikslūs duomenys, todėl Amerikos valstybinių kelių ir transporto vadovų asociacija (AASHTO) ir AASHTO technikos komitetas priėmė jį kaip laikiną standartą (AASHTO TP 110-14 2016).

1.2.2. Aukštos temperatūros šarminės korozijos tyrimo metodai

Užpildų šarminės korozijos potencialui tirti taikomi keli laboratoriniai autoklaviniai tyrimo metodai. Šie metodai paprastai remiasi stebima skiedinio ar betono bandinių plėtra, tačiau galima ištirti tik kai kurių rūšių užpildus.

Tang *et al.* (Tang *et al.* 1983), remdamiesi Duncan *et al.* (Duncan *et al.* 1973) darbais, atliko bandymus įvairiose autoklavo temperatūrose ir sukūrė kinų autoklavinio tyrimo metodą. Gaminamos $10 \times 10 \times 40$ mm dydžio skiedinio sijos, pridant 1,5 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ nuo cemento masės. Sijos kietinamos formose 24 val. drėgmės kameroje, išimamos ir dar 4 val. kietinamos 100°C temperatūros garuose, paskui dedamos į 10 % KOH tirpalą ir autoklavuojamos 6 val. 150°C temperatūroje. Šiame tyrime užpildams naudojamas 8-ių skirtingų rūšių reaktyvusis smėlis ir 17-os rūšių nereaktyvusis smėlis. Matuojama bandinių plėtra ir rezultatai lyginami su rezultatais, gautais taikant ASTM C289-71 ir ASTM C227-71 tyrimo metodus. Deja, buvo lyginama tik bandinių, kuriems nepasireiškė šarminės korozijos, plėtra su bandymų, atliktų pagal ASTM C227 metodą, rezultatais. Bandinių su reaktyviaisiais užpildais plėtra nebuvo lyginama. Šiame tyrimo metode nėra rekomenduojamos plėtros ribos, tačiau bandinių su reaktyviais užpildais plėtra svyravo nuo 0,105 % iki 1,324 %.

1984 m. Statybos tyrimų korporacija (angl. *General Building Research Corporation*, GBRC) sukūrė paspartintąjį tyrimų metodą (Tamura 1987). Tyrimui šiuo metodu suformuojamos $40 \times 40 \times 160$ mm skiedinio sijos iš vienodų svorio dalių bandomojo smėlio, nereaktyvaus smėlio ir įprastinio cemento. $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ekvivalentas padidinamas į mišinio vandenį įpilant NaOH iki 2,5 % nuo cemento masės. Po dviejų dienų kietinimo sijos sudedamos į verdantį 111°C temperatūros vandenį slėgio inde (0,05 MPa slėgi) ir laikomos 2 valandas. Išimtos iš autoklavo sijos apžiūrimos, ar nėra įtrūkių, ir išmatuojamas ultragarso impulso sklidimo greitis. Bandymo metu buvo nustatomas Jungo tampros modulis, tačiau nepateikiamos jo nustatymo rekomendacijos. Tamura ištyrė 152 užpildus ir palygino 46 bandinių tyrimo rezultatus su ASTM C289 cheminio bandymo ir ASTM C227 betono sijos bandymo rezultatais. GBRC tyrimo rezultatai gerai koreliavo su abiejų bandymų rezultatais.

Tame pačiame straipsnyje Tamura pasiūlė tyrimo metodą, labai panašų į GBRC paspartintąjį metodą. Skirtumas tik tas, kad čia naudojami 100×200 mm

betono cilindrai ir didesnis šarmų kiekis užpilduose, t. y. 9 kg/m^3 . Deja, straipsnyje nepateikiami šio tyrimo rezultatai.

Nishibayashi *et al.* (Nishibayashi *et al.* 1987) skiedinio bandinius tyrė autoklave pagal įvairius parametrus. Tyrimui suformuojamos $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ skiedinio sijos. $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ekvivalentas padidinamas pridedant NaOH iki 1,5 % nuo cemento masės. Sijos 24 val. kietinamos 20°C temperatūros vandenyje, po to 4–5 valandas autoklavuojamos 128°C temperatūroje, esant $0,15 \text{ MPa}$ slėgiui. Reaktyviųjų smėlių ir nereaktyviojo malto smėlio įtaka nustatoma matuojant sijų pailgėjimą, o gauti rezultatai lyginami su ASTM C227 metodu gautais rezultatais. Autoklavuotų sijų plėtros rezultatai buvo panašūs į ASTM C227 tyrimo metodu gautus rezultatus po 20 savaičių. Tokiu būdu bandymo trukmė sutrumpėja apie 98,5 %. Nepaisant to, minėtas tyrimo metodas nėra tinkamas smulkiojo užpildo tyrimams. Be to, buvo išbandyti tik trys užpildai. Tyrimo metode nenurodoma plėtros riba.

Fournier *et al.* (Fournier *et al.* 1991), įvertinę įvairius tyrimo parametrus, pasiūlė autoklavuotos skiedinio sijos tyrimo metodą. Kaip ir ASTM C227 tyrimo metode, naudojamos $25 \times 25 \times 285 \text{ mm}$ skiedinio sijos. $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ekvivalentas padidinamas pridedant NaOH iki 3,5 % nuo cemento masės. Po dviejų dienų kietinimo sijos autoklavuojamos 5 val. 130°C temperatūroje ir $0,172 \text{ MPa}$ slėgyje. Išmatuotas pailgėjimas rodo užpildo reaktyvumo laipsnį.

Šiuo tyrimo metodu buvo išbandyta 40 karbonatinių užpildų iš Kanados Kvebeko provincijos Lawrence žemumų, kuriose gausu silicio dioksido turinčio kalkakmenio, sukeliančio betono šarminę koroziją. Tyrimo rezultatai buvo palyginti su betono prizmės, ASTM C227 ir Pietų Afrikos NBRI tyrimų metodų gautais rezultatais (Hooton ir Rogers 1993). Autoklavinio tyrimo efektyvumas buvo 93 %, lyginant su bandinių plėtra po 6 mėn. pagal betono prizmės metodą, o Pietų Afrikos NBRI metodo efektyvumas buvo 88 % lyginant su betono prizmės tyrimų metodu. Šiame tyrime efektyvumas apibrėžiamas kaip bandinių, atitikusių reaktyvumo klasę pagal betono prizmės tyrimų metodikos rezultatus, procentas: 93 % efektyvumas reiškia, kad 37 iš 40 užpildų reaktyvumas yra toks pats autoklavuojant ir tiriant betono prizmės metodu. Laboratorinis variacijos koeficientas yra 4,4 %, kai bandymus atlieka tas pats laborantas su tomis pačiomis medžiagomis.

Berube *et al.* (Berube *et al.* 1992) aprašė autoklavuotos skiedinio sijos tyrimo metodiką, panaudodamas 106 užpildus. Iš šių užpildų 40 jau buvo bandytų pirmiame tyrime. Bandinių plėtros reikšmės palygintos su bandinių su tais pačiais užpildais tirtų betono prizmės ir Pietų Afrikos NBRI tyrimų metodų plėtros reikšmėmis. 81 % bandinių, tirtų autoklavuojant ir CPT metodu, ir 75 % bandinių, tirtų autoklavuojant ir Pietų Afrikos NBRI metodu, rezultatai sutapo. Antrajame tyrime nebuvo matuojama rezultatų variacija.

Nishibayashi *et al.* įvertino betono bandinių tyrimo autoklavuojant parametrus (Nishibayashi *et al.* 1996). Jie atliko bandymus keisdami šarmų kiekį bandiniuose, išreikštą $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ekvivalentu nuo 1,0 % iki 4,0 %, keisdami autoklavo

slėgį nuo 0,10 iki 0,30 MPa ir bandymo trukmę nuo 1 iki 8 val. Bandinių matmenys buvo 75×75×400 mm. Betono prizmės plėtra matuojama ir lyginama su prizmių, 6 mėnesius laikomų 40 °C temperatūroje esant 100 % santykinei drėgmei. Pastebėta, kad abiem kondicionavimo būdais gaunama ta pati plėtra, kai prizmės iš betono su 3,0 % Na₂O_{eq} laikomos 4 valandas 0,20 MPa slėgyje. Kaip ir kituose tyrimuose, naudotas ribotas užpildų kiekis ir rūšys. Reaktyvieji stambieji užpildai nebuvo tiriami, o iš smulkiųjų užpildų buvo tirtas tik reaktyvusis smulkusis bronzito andezito užpildas. Plėtros ribos nebuvo nurodytos. Pagal gautus duomenis reaktyviųjų užpildų plėtra svyravo nuo 0,60 % iki 0,65 %.

Autoklavuotos betono prizmės bandymo (angl. *Autoclaved Concrete Prism Test*, ACPT) parametrus nustatyti Giannini ir Folliard (2013) tyrė bandinius, kuriuose šarmų kiekis yra 2,0 %, 2,5 % ir 3,0 % Na₂O_{eq} ekvivalento, o autoklavavimo 133 °C temperatūroje trukmė – 4, 6 ir 24 val. Pirmame tyrimo etape tyrėjai išbandė du nereaktyviuosius užpildus ir tris labai reaktyvius užpildus, kurių reaktyvumas žinomas iš paspartintųjų betono sijos ir betono prizmės tyrimų metodų bei eksploatacinių charakteristikų natūralioje aplinkoje. Pirmojo etapo rezultatai parodė, kad bandinių su labai reaktyviu užpildu, kurio šarmų kiekis 2,0 % Na₂O_{eq} ekvivalento, plėtra labai maža, todėl šarmų kiekis vėlesniuose tyrimo etapuose nebuvo vertintas. Bandinių, kuriuose šarmų kiekis yra 2,5 % ir 3,0 %, šarminės korozijos tyrimų rezultatai rodė didesnę plėtrą, todėl tyrėjai, taikydami paskutinį tyrimo metodą, nutarė naudoti 3,0 % Na₂O_{eq} siekdami didesnės reaktyviųjų užpildų plėtros. Taip pat buvo nutarta tirti tris skirtingas autoklavavimo trukmes. Po 24 val. buvo matomas didesnis skirtumas tarp reaktyviųjų ir nereaktyviųjų užpildų. Antrame tyrimo etape tomis pačiomis sąlygomis buvo bandomi šeši papildomi skirtingo reaktyvumo užpildai, kurių šarmų kiekis – 3,0 % Na₂O_{eq} ekvivalento, o autoklavavimo laikas – 24 val. Šiame etape buvo teisingai nustatyti visi reaktyvieji ir nereaktyvieji užpildai. Kiekviename trijų betono prizmių komplekte variacijos koeficientas lygus arba mažesnis už 8,6 % vidutinės prizmių plėtros. Atliekant bandymą siūloma plėtros riba yra didesnė nei 0,08 %, kad nereaktyvieji užpildai, sukėlę nedidelę plėtrą, nebūtų priskirti prie reaktyviųjų užpildų.

Šiame tyrime autoklavuotos betono prizmės bandymas pasirodė esąs tinkamas būdas nustatyti betono užpildų sukeliamos šarminės korozijos potencialą.

1.2.3. Petrografinė analizė

Sukietėjusio betono petrografinė analizė atliekama siekiant patvirtinti, kad laboratorinių bandinių arba realių betono konstrukcijų plėtrą sukelia šarminė korozija. Petrografinėje analizėje šarminės korozijos sukeltas problemas rodo į cementinį akmenį pereinantys užpildo mikrotrūkiai, reakcijos produktai, reakcijos juostos aplink užpildo daleles, blogas užpildo ir cemento teslos sukibimas. Nors šarminės

korozijos reakcijos produktas – gelis – skiriasi savo sudėtimi, jis visuomet būna sudarytas iš silicio, kalcio, natrio ir kalio (Poole 1992).

Šarminės korozijos petrografines charakteristikas kartais galima pamatyti ir be mikroskopo, jei plėtra yra labai intensyvi. Vis dėlto reakcijos produktui nustatyti ir apibūdinti būtina mikroskopinė analizė. Gelių sudėtį galima efektyviai nustatyti su skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu, rentgeno spektroskopu ir bangų dispersija (SEM/EDX), kurie turi atskirų elementų žymėjimo galimybę. SEM/EDX analizei ruošiamą bandinį reikia kruopščiai padalinti ir nupoliruoti betoną iki lygaus blizgaus paviršiaus.

1.3. Mineralinių priedų poveikis sukietėjusio betono savybėms

Betonas pasižymi mechaninėmis savybėmis: susitraukimu ir valkšnumu, gniuždymo stipriu, tempimo stipriu, lenkimo stipriu ir tamprumo moduliu. Gniuždymo stipris – viena svarbiausių betono savybių. Betono, kuriame dalis cemento pakeista mineraliniais priedais, mechaninės savybės nėra tiesiogiai susijusios su gniuždymo stipriu, o to paties kiekio skirtingų mineralinių priedų poveikis cementinio akmens mechaninėms savybėms nėra vienodas (Guneyisi *et al.* 2008).

Mineraliniai priedai – tai smulkios silicio dioksido turinčios medžiagos, gana dideliais kiekiais dedamos į maišomą betoną. Pagrindinis mineralinių priedų šaltinis – gamybos procesuose susidariusios atliekos. Europoje šios mineralinės medžiagos paprastai vadinamos priedais. Daugelis tyrėjų vadina juos papildomomis cementinėmis medžiagomis (angl. *Supplementary Cementing materials*, SCM) (Li 2011).

Lakieji pelenai yra vienas iš anglį deginančių šiluminių elektrinių šaltinių produktų. Susmulkinta anglis naudojama šildyti vandeniui, kurio garai suka generatorius, verčiančius šiluminę energiją elektra (Alonso *et al.* 1991). Šiam tikslui naudojamos įvairios anglys, tokios kaip lignitas, pusiau bituminė ir bituminė anglis bei antracitas. Be anglies ir lakiųjų medžiagų anglyje yra priemaišų, tokių kaip molis, skalūnas, lauko špatas ir kt. Degimo metu priemaišų pelenai sklendo dujose, esančiose kaminuose. Kai kurie koaguliuoja ir nusėda, sudarydami dugno pelenus, o kitus dujos nuneša į mechaninius separatorius arba elektrostatiniais nusodintuvus. Tokie pelenai vadinami lakiaisiais pelenais (Tokuyay 1987).

Lakieji pelenai yra smulki kieta medžiaga, kurios dalelių dydis kinta nuo 0,2 iki 200 µm. Bet kurių lakiųjų pelenų dalelių dydis priklauso nuo anglies smulkumo ir šiluminės elektrinės kaminų dujų valymo įrenginių. Mechaniniais separatoriais surinkti lakieji pelenai yra stambesni, lyginant su elektrostatiniais nusodintuvais surinktais pelenais. Lakiųjų pelenų spalva gali būti nuo šviesiai rusvos iki rudos ir nuo pilkos iki juodos, atsižvelgiant į juose esančius mineralus. Krūvoje

jie būna pilkšvos spalvos, kuri gali būti tamsesnė, jei yra didesnis kiekis nesudegusios anglies (Tokyay *et al.* 2016).

Lakiųjų pelenų cheminę sudėtį lemia deginamosiose anglyse esančios mineralinės medžiagos. Daugiau nei 85 % lakiųjų pelenų sudaro silicio dioksidas (SiO_2), aliuminio oksidas (Al_2O_3), anglies oksidas (Fe_2O_3), kalcio oksidas (CaO) ir magnis (MgO). Paprastai lakieji pelenai iš lignitinės ir pusiau bituminės anglies turi daugiau kalcio oksido nei lakieji pelenai iš bituminės anglies ir antracito (Tokyay *et al.* 2016).

Dėl mažų dalelių, kurių struktūra nėra kristalinė, lakieji pelenai turi geras pucolanines savybes, o pelenai, kuriuose daug kalcio oksido, turi pucolanines ir hidraulinės savybes. 1910 m. pastebėtos pucolaninės lakiųjų pelenų savybės (Anon 1914) sudarė galimybes nuo 1930 m. naudoti juos kaip svarbią betono sudedamąją dalį.

Lakiųjų pelenų cheminė ir mineralinė sudėtis bei jų fizinės savybės priklauso nuo naudojamos anglies sudėties, deginimo būdo šiluminėje elektrinėje, deginimo įrangos, pelenų surinkimo būdų ir kt. Taigi iš skirtingų elektrinių ir netgi tos pačios šiluminės elektrinės skirtingu metu surinktų pelenų savybės skirsis (Tokyay *et al.* 2016).

Aukštakrosnių šlakas yra šalutinis geležies pramonės produktas. Pasaulyje per metus susidaro 50 mln. t aukštakrosnių šlako (Altun *et al.* 2002), Europoje – beveik 12 mln. t. Dėl intensyvaus tiriamojo darbo per pastaruosius 30 metų šiaudien apie 65 % aukštakrosnių šlako yra naudojama kitose pramonės srityse, tačiau likę 35 % šlako vis dar išmetama į sąvartynus (Motz *et al.* 2001).

Aukštakrosnių šlako granulės pirmą kartą pradėtos gaminti Vokietijoje 1853 m. (Malhotra 1996). Sumaltas šlakas naudojamas kaip cementinė medžiaga betono gamyboje nuo XX a. pradžios (Abrams 1925). Šiaurės Amerikoje į standartinių betoną dedamas sumaltas granuliuotas šlakas paprastai sudaro nuo 30 % iki 45 % cementinės medžiagos betono mišinyje (PCA 2000). Kai kuriuose šlakiuose betonuose šlakas sudaro 70 % cementinės medžiagos. Pagal ASTM C989 (AASHTO 2000) standartą šlakas žymimas pagal reaktyvumo laipsnį: 80 (žemo reaktyvumo indekso šlakai), 100 (vidutinio reaktyvumo indekso šlakai) arba 120 (aukšto reaktyvumo indekso šlakai). ASTM C1073 standartas aprašo paspartintąją sumalto granuliuoto aukštakrosnių šlako hidraulinio aktyvumo nustatymo metodiką, o ACI 233 (ACI 2003) standarte pateikiama išsami šlakų apžvalga. Kadangi aukštakrosnių šlako cheminė sudėtis būna labai skirtinga, skiriasi ir mineralinė šlako sudėtis. Dažniausiai pasitaikantys mineralai šlake: olivinas, mervinitas, C_3S , C_2S , C_4AF , C_2F , RO fazė (kietas CaO-FeO-MnO-MgO tirpalas) ir laisvas CaO . Šlako cheminė sudėtis: 45–60 % CaO , 10–15 % SiO_2 , 1–5 % Al_2O_3 , 3–9 % Fe_2O_3 , 7–20 % FeO ir 3–13 % MgO (Shi *et al.* 2000). C_3S , C_2S , C_4AF ir C_2F sustiprina šlako cementines savybes. Vis dėlto C_3S kiekis aukštakrosnių šlake yra gerokai

mažesnis nei cemento. Taigi aukštakrosnių šlakas gali būti laikomas silpnu cemento klinkeriu (Tsakiridis *et al.* 2008).

Silicio dioksido mikrodulkės yra šalutinis silicio metalų lydalo gamybos produktas. Silicio metalų lydalai gaminami elektros lanko krosnyse, kuriose aukštesnėje nei 1700 °C temperatūroje redukuojamas kvarcas. Vienos iš daugelio krosnyje vykstančių cheminių reakcijų produktas yra SiO garai, kurie oksidacijos ir kondensacijos metu tampa mažais amorfinio silicio rutuliukais (Tokay 2016).

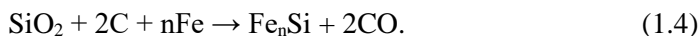
Tipinėje geležies silicio lydalo gamykloje nustatytais dalimis maišomas labai grynas kvarcitas (turintis apie 95 % SiO₂), metalo laužas arba geležis/geležies rūda ir koksas, medžio drožlės, anglis ir šis mišinys dedamas į elektros lanko krosnį. Krosnyje redukuota geležis ir silicio dioksidas susijungia į geležies silicio lydalą, kuris imamas iš krosnies dugno, dedamas į formas ir atvėsinaamas. Dalis SiO išeina iš krosnies su kaminų dujomis, kur susijungęs su oru sudaro silicio dioksido mikrodulkes, surenkamas dūmų filtruose. Gautose silicio dioksido mikrodulkėse yra 10–25 % kvarco iš lydalo gamybos mišinio. Pasaulyje per metus pagaminama apie 1,2 mln. tonų silicio dioksido mikrodulkių (Fidjestol *et al.* 2014).

Silicio metalo lydalo gamyboje vyksta tokia cheminė reakcija (Tokay 2016):



čia SiO₂ – kvarcas; C – anglis iš kokso, anglies ir medžio drožlių.

Geležies silicio lydalo gamyboje į mišinį dedama geležis. Tuomet vyksta tokia reakcija:



Realybėje krosnyje vykstančios cheminės reakcijos yra sudėtingesnės, nei čia aprašyta. SiO garai ir silikono karbidas (SiC) yra tarpiniai produktai. Iš krosnies išėję SiO garai liečiasi su oru ir sudaro silicio dioksido mikrodulkes:



Silicio dioksido mikrodulkės susidaro ir iš kitų silicio metalo lydalo gamyboje, tokių kaip geležies chromo silicio lydalo, silicio mangano lydalo ir kalcio silicio lydalo. Šių lydalo gamyboje į žaliavų mišinį atitinkamai dedama chromo, mangano ir kalcio oksido. Akivaizdu, kad žaliavų sudėtis turi įtakos ir silicio dioksido mikrodulkių sudėčiai (Tokay 2016).

Gamyklose gali būti skirtingos konstrukcijos elektros lanko krosnių, bet silicio dioksido mikrodulkių požiūriu yra svarbios dvi: su šilumos grąžinimo sistema ir be jos. Iš krosnies su šilumos grąžinimo sistema kaminų dujos išeina 800 °C temperatūros, o iš krosnies be šilumos grąžinimo sistemos – 200 °C. Pirmuoju atveju didžioji dalis anglies sudega, o antruoju atveju kaminų dujose yra nesudegusios anglies (Mehta 1982). Dėl to šiuose procesuose gaunamos skirtingos silicio

dioksido mikrodulkės. Skirtingai nuo kitų pramonės šakų šalutinių produktų, naudojamų cemento ir betono gamyboje, iš to paties gamintojo gaunamos silicio dioksido mikrodulkės savo savybėmis paprastai nesiskiria (Pistilli *et al.* 1984).

Ceolitai yra šarminių ir žemės šarminių metalų kristaliniai hidroaliumo silikatai su atviru trimačiu karkasu (tektosilikatai), kuriuos sudaro: a) pasikartojantys pagrindiniai silicio oksido ir aliuminio oksido tetraedrai, sudarantys vieno aukšto ketursienius arba šešiasienius žiedus, dviejų aukštų ketursienius arba šešiasienius žiedus arba didesnius simetriškus $\text{SiO}_4\text{--AlO}_4$ daugiasienius karkasus; b) krūvį išlyginantys, besikeičiantys mono ir bivalenčiai šarminių bei žemės šarminių metalų katijonai (Na^+ , Ca_2^+ , K^+ , Mg_2^+ , Sr^+ , Ba_2^+) susisiekiąčiose karkaso tuštumoje arba plačiuose kanaluose bei ertmėse tarp karkasų; c) tuštumoje esantis labai skirtingas skaičius vandens molekulių, turinčių silpną ryšį su anijoninio karkaso atomais (Mumpton 1977).

Ceolitai skirstomi į šeimas, kaip pateikta 1.1 lentelėje (IARC 1996).

1.1 lentelė. Ceolitų šeimos mineralai (IARC 1996)

Table 1.1. Zeolite family minerals (IARC 1996)

Ceolitų šeima	Mineralai
Analcimas	Analcime, polucitas, vairakitas, belbergitas, bikitaitas, bogsitas, brevsteritas
Šabazitas	Šabazitas, vilhendersonitas, kovlesitas, dachiarditas, edingtonitas, epistilbitas, erionitas, fužasitas, ferieritas
Gismondinas	Amicitas, garonitas, gismondinas, gobinsitas, gmelinitas, gonarditas, gusekrykitas
Harmotomas	Harmotomas, filipsitas, velsitas
Hoilanditas	Klinoptilolitas, hoilanditas, laumontitas, levainas, mazitas, merlinoitas, montesomaitas, mordenitas
Natrolitas	Mezolitas, natrolitas, skolecitas, ofretitas, paranatrolitas, paulingitas, perliailitas
Stilbitas	Bareritas, stilbitas, steleritas, tomsonitas, černičitas, jugavaralitas

Gamtoje ceolitai per ilgus metus susiformuoja kristalų pavidalu mažose bazaltinių uolienų ertmėse taip pat dėl vulkaninio tufo arba stiklo sąveikos su sūriu vandeniu. Natūralūs ceolitai susidaro įvairiose geologinėse aplinkose, pavyzdžiui, šarminėse dykumose, ežerų nuosėdose, pelenų tvenkiniuose ir jūros vandenų nuosėdose gana žemoje temperatūroje natūraliomis sąlygomis. Jie kristalizuojasi geologiškai jaunose metamorfinėse uolienose kalnuotose vietovėse. 1950 m. geologai atrado, kad yra milijonai tonų vulkaninio tufo, sudaryto daugiausia iš ceolitų (Scott *et al.* 2003). Ceolitų kristalai dėl savo unikalios struktūros užsipildo vandeniu, kurį galima išstumti tik kaitinant. Išdžiovintų kristalų vidus yra korėtas, jame

yra atomų principu išsidėsčiusių ertmių arba porų, kurių plotis yra nuo 2 iki 10 Å (Somerset *et al.* 2005; Wang *et al.* 2006).

Natūralūs ceolitai, tokie kaip klinoptilolitas (vadinamas klinoceolitu) ir šabazitas, naudojami valymui, taip pat kaip trąšos, gerinančios dirvos būklę ir padedančios augalams geriau įsisavinti maistines medžiagas. Klinoptilolitas plačiai naudojamas žemės ūkyje dirvai gerinti ir kaip pašarų priedas dėl didesnio rūgšties atsparaus silicio dioksido kiekio ($\text{Si}/\text{Al} = 1 : 5$). Vis dėlto natūraliuose ceolituose yra kitų mineralų priemaišų (pvz., Fe^{++} , SO_4^{--} , kvarco, kitų ceolitų ir amorfinio stiklo), todėl jie gali būti netinkami komerciniam naudojimui ten, kur reikalingas grynumas ir vienodumas (Jha *et al.* 2011).

Betono gniuždymo stipris – tai betono, kuris suyra veikiamas gniuždymo apkrovos, stiprumo riba. Taigi, dirbant su bet kokio tipo betonu, svarbiausia nustatyti šią svarbią savybę. Almusallam (1995) nustatė visas cementinio akmens su 20 % lakiųjų pelenų priedo mechanines savybes ir padarė išvadą, kad lakieji pelenai einant laikui didina betono gniuždymo stiprį. Lėtesnį gniuždymo stiprio didėjimą lemia lėtai pasireiškiantis lakiųjų pelenų reaktyvumas ir mažesnis paviršiaus plotas. Dėl to Mehta ir Gjörv (1982) rekomenduoja naudoti normalaus ir didelio aktyvumo mineralinius priedus. Ši rekomendacija grindžiama betono, kuriame 30 % cemento pakeista lakiaisiais pelenais, gniuždymo stiprio vertėmis po 7 ir 28 dienų. Tyrėjai (Mehta ir Gjörv 1982) nustatė, kad betono su lakiaisiais pelenais gniuždymo stipris mažėja, lyginant su standartiniu betonu, tačiau po 28 dienų betono, kuriame dalis cemento buvo pakeista lakiaisiais pelenais ir silicio dioksido mikrodulkėmis santykiu 50 : 50, gniuždymo stipris buvo didesnis. Pala *et al.* (2007) taip pat patvirtino, kad betono su lakiaisiais pelenais ankstyvasis gniuždymo stipris mažėja, o ilgalaikis gniuždymo stipris didėja. Pala *et al.* (2007) įvertino C ir F klasių pagal ASTM lakiųjų pelenų mišinio poveikį betono mechaninėms savybėms ir ilgaamžiškumui. Buvo naudojamos trys mišinio su C ir F klasių pagal ASTM lakiaisiais pelenais sudėty. Cementinių medžiagų kiekis mišinyje buvo vienodas – 40 %. Autoriai (Naik *et al.* 1998) nurodo, kad betono su C ir F klasių pagal ASTM lakiųjų pelenų mišiniu savybės yra geresnės nei betono be lakiųjų pelenų arba betono su C klasės pagal ASTM lakiaisiais pelenais. Siddique (2004) atlikto tyrimo rezultatai parodė, kad, didesnę cemento kiekį pakeitus lakiaisiais pelenais, sumažėja betono gniuždymo stipris.

Kaip ir betono su lakiaisiais pelenais, ankstyvasis betono su aukštakrosnių šlaku stipris yra mažesnis nei įprastinio betono su cementu dėl lėtos hidracijos ir didesnio kiekio šlako, tačiau ilgalaikis stipris didesnis nei paprasto betono, jei yra pakankamai drėgmės tolesnei reakcijai vykti tarp pirminių hidracijos produktų ir aukštakrosnių šlako (Jianyong ir Yan, 2001). Jianyong ir Yan (2001) palygino betono bei betono su aukštakrosnių šlako ir lakiųjų pelenų mišiniu rezultatus. Betono su aukštakrosnių šlaku ir lakiųjų pelenų mišiniu gniuždymo stipris buvo didžiausias.

Dalies cemento pakeitimas silicio dioksido mikrodulkėmis turi didelį poveikį betono gniuždymo stipriui. Literatūroje rašoma, kad betono gniuždymo stipris didėja, kai betone yra 30–100 % SiO_2 mikrodulkių (Newman ir Choo 2004). Betonas su SiO_2 mikrodulkėmis panaudotas daugelyje įžymių statinių, tokių kaip Petronas bokštas (Malaizija), kuriuose betono gniuždymo stipris yra 100 MPa (Newman ir Choo 2004). Panašius rezultatus cituoja Pala *et al.* (2007), kurie nurodo, kad, pakeitus bet kokį kiekį cemento SiO_2 mikrodulkėmis, ankstyvasis betono gniuždymo stipris didėja, bet ilgalaikis gniuždymo stipris mažėja. Mokslininkai (Pala *et al.* 2007) taip pat palygino betono su SiO_2 mikrodulkėmis ir betono su lakiaisiais pelenais gniuždymo stiprius bei įrodė, kad betono su SiO_2 mikrodulkėmis ankstyvasis stipris dėl geresnių pucolaninių savybių didėja daugiausia, lyginant su betonais, kuriuose skirtingas cemento kiekis pakeistas lakiaisiais pelenais. Bágel (1998) teigia, kad skiedinyje su priedais tarp gniuždymo stiprio ir SiO_2 mikrodulkių kiekio yra atvirkštinis ryšys. Be to, esant pastoviam v/c santykiui, pridėtos SiO_2 mikrodulkės didina gniuždymo stiprį.

Khatib ir Hibbert (2005) tyrė aukštakrosnių šlako ir metakoalino poveikį betono stipriui. Jie pakeitė iki 80 % cemento aukštakrosnių šlaku ir iki 20 % metakoalinu, visuose mišiniuose išlaikydami pastovų v/c santykį 0,5. Tyrėjai nustatė, kad metakoalino priedas dėl greito reaktyvumo padidina betono stiprį, ypač kietėjimo pradžioje, o aukštakrosnių šlakas sumažina betono stiprį per pirmąsias 28 dienas, nes kietėjimo pradžioje aukštakrosnių šlakas reaguoja lėtai. Qian ir Li (2001) teigia, kad betono su metakoalinu gniuždymo stipris kietėjimo pradžioje ir vėliau gerokai padidėja, didinant metakoalino kiekį nuo 0 % iki 5 %, 10 % ir 15 %. Tyrėjai (Qian ir Li 2001) nurodė, kad betono, kuriame cementas buvo pakeistas 15 % metakoalinu, stipris padidėjo 51 % kietinus tris dienas. Po šio laikotarpio bandinių su 10 % ir 15 % metakoalino gniuždymo stipris buvo didesnis nei įprastinio betono, kietinto 28 dienas. Taigi metakoalino priedas padidina ankstyvąjį stiprį.

Poon *et al.* (2001) gavo geriausius ankstyvojo gniuždymo stiprio rezultatus, įdėję į cemento tešlą 10 % metakoalino, tačiau, naudojant didelį kiekį metakoalino, reikia didelių plastiklio dozių (Qian ir Li 2001). Betono su metakoalino priedu ankstyvasis stipris yra didesnis nei betono su lakiaisiais pelenais ir SiO_2 mikrodulkių priedais (Poon *et al.* 2001). Zhang ir Malhotra (1995) nurodė mažesnę gniuždymo stiprio padidėjimą po 28 dienų, tačiau jie patvirtino, kad betono su metakoalino priedu ilgalaikis stipris didėja greičiau nei ankstyvasis stipris.

Siddique (2004) lygino skirtingo kietėjimo laiko paprastą betoną su mineraliniais priedais modifikuotu betonu ir nustatė, kad, cementą pakeitus 40 %, 45 % ir 50 % lakiaisiais pelenais, betono lenkimo stipris sumažėja. Kita vertus, smulkųjų užpildą pakeitus nuo 10 % iki 50 % lakiaisiais pelenais, lenkimo stipris padidėja.

SiO_2 mikrodulkėmis modifikuoto betono lenkimo stipris priklauso nuo kietinimo būdo ankstyvajame etape (Newman ir Choo 2004). Zhang ir Malhotra

(1995) nustatė, kad didelio stiprumo betono su SiO_2 mikrodulkėmis lenkimo stipris yra panašus į betono su ryžių lukštų pelenais stiprį, kai vietoje cemento naudojama 10 % priedo bei yra pastovus vandens ir rišamosios medžiagos santykis, tačiau abiejų betonų lenkimo stipris didesnis už betono be priedų stiprį.

Po 28 kietėjimo parų betono su 10–15 % metakolino lenkimo stipris yra didesnis 32 % ir 38 %, o po 80 kietėjimo parų – 13 % ir 24 %. Cementą pakeitus 5 % metakolinu, lenkimo stipris keitėsi labai nedaug (Qian ir Li 2001). Justice *et al.* (2005) nustatė, kad betono su metakolinu ir betono su SiO_2 mikrodulkėmis lenkimo stipris yra kur kas didesnis nei betono be mineralinių priedų.

Ryžių lukštų pelenų priedas neturi teigiamo poveikio betono lenkimo stiprio didėjimui po 28 kietėjimo parų (Alvarez 2006). Vis dėlto tokio betono lenkimo stipris po 90 ir 180 dienų yra didesnis, lyginant su betonu be ryžių lukštų pelenų (Habeeb ir Fayyadh 2009). Alvarez (2006) nustatė, kad betono su 10 % ryžių lukštų pelenais lenkimo stipris yra didesnis už betono be mineralinių priedų stiprį.

Betono kokybė dažnai nustatoma atliekant neardomuosius bandymus ultragarsu. Šie metodai paprastai grindžiami ultragarso impulso sklaidimo greičiu, kuris labai susijęs su mechaninėmis savybėmis ir tiesiogiai su tamprumo moduliu. Tyrimo metuose betonas laikomas homogeniška medžiaga (Ayub *et al.* 2014).

Pažangiam betono kokybės nustatymui reikalingi patikimi tyrimai ir objektyvūs matavimai. Atliekant ultragarso impulso sklaidimo greičio bandymą nustatoma, kaip laikui bėgant kinta bangos amplitudė, greitis ir dažnis medžiagai kietėjant. Cementinės matricos hidratacija sukelia kietėjimo procesą, kurio metu cementinės medžiagos būseną keičiasi iš suspensijos į kietąją (Gül *et al.* 2005).

Tyrimais įrodyta, kad SiO_2 mikrodulkės didina skiedinio stiprį (Huang ir Feldman 1985). Tai pat įrodyta, kad SiO_2 mikrodulkės turi didesnę poveikį su kietėjusiam betonui nei tešlai (Rosenberg ir Gaidis 1989). Betono su SiO_2 mikrodulkėmis stiprio didėjimas siejamas su tuo, kad didėja užpildo ir tešlos jungtis, kuri sukuria mažiau porėtą struktūrą – zoną su silicio dioksido mikrodulkių priedu betone.

1.4. Betono komponentų poveikis šarminei korozijai

Šarminė korozija gali sukelti ardomąją betono plėtrą, kuriai įtaką daro daugybė veiksnių: aktyvintųjų medžiagų, rišiklių, reaktyviųjų užpildų kiekis, tyrimo metodai. Norint suprasti tiriamų medžiagų elgesį, reikia įvertinti visus veiksnius (Shi *et al.* 2015).

Ruošiant betono mišinį, reikia įvertinti smulkiąsias daleles, nes jos daro įtaką vandens poreikiui, taip pat betono mišinio ir sukietėjusio betono savybėms (Bianchi *et al.* 2013). Įvairūs betono mišinių priedai didina ilgaamžiškumą,

betono mišinio reologines savybes ir sukietėjusio betono mechanines savybes (Ayub *et al.* 2013).

Lakieji pelenai ar aukštakrosnių šlakas neleidžia atsirasti šarminiai betono korozijai. Šarminės korozijos poveikį galima sumažinti naudojant tinkamo tipo cementą, turintį susmulkintų lakiųjų pelenų arba aukštakrosnių šlako (Crucq 2005).

Reaktyviųjų užpildų tipas, kiekis, mineralinė sudėtis ir granulimetrinė sudėtis turi įtakos šarmų ir užpildų reakcijai (Shi *et al.* 2015).

Mineralinių priedų nauda dažnai siejama su sukietėjusio betono savybėmis, tačiau mineraliniai priedai taip pat daro įtaką betono mišinio savybėms: vandens poreikiui, hidratacijos šilumai, reaktyvumui (Khan *et al.* 2014).

1.4.1. Rišamosios medžiagos poveikis

Betono šarminės korozijos padeda išvengti nereaktyvieji užpildai. Deja, tokie užpildai ne visuomet prieinami betono gamintojams dėl to, kad jų nėra tame regione arba jie labai brangūs. Kitas būdas – sumažinti betono porų tirpalo šarmingumą, kad nevyktų šarminės korozijos reakcija su naudojamais užpildais. To galima pasiekti naudojant tinkamus mineralinius priedus, kurie sumažina šarmų ir užpildų reakcijos tikimybę (Kawamura and Takemoto 1988; Duchesne and Bérubé 1994; Thomas 1996; Ferraris *et al.* 2000), ir naudoti mažą Na_2O ekvivalentą turintį cementą (Hobbs 2000; Leming ir Nguyen 2000).

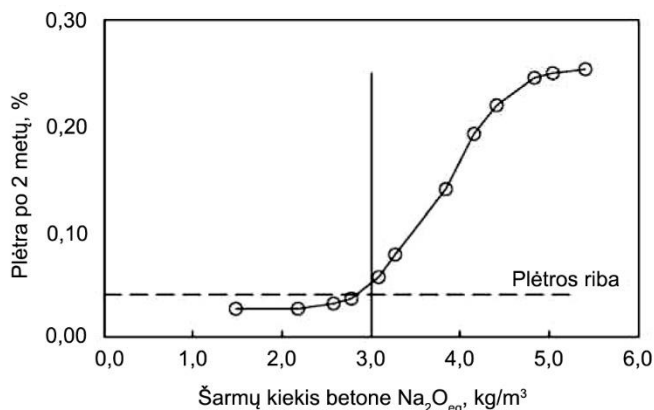
Į cementą šarmai patenka iš gamybai naudojamų žaliavų, daugiausia iš molio. Šarmų kiekis cemente ypač padidėjo, įdiegus veiksmingas ekologines priemones, t. y. gaudant iš krosnių išlekiančias dulkes ir jas pakartotinai naudojant gamybai. Ruošiant betono mišinį, vandenyje ištirpsta didžioji dalis įvairios būklės natrio ir kalio junginių, į tirpalą pereina Na^+ ir K^+ jonai ir su OH^- sudaro stiprius NaOH ir KOH šarmus. Jie reaguoja su rūgščiomis, dažniausiai amorfinėmis ir mikrokristalinėmis užpildų dalelėmis, kuriose vyrauja SiO_2 . Su šarmais reaguoja ne tik SiO_2 , bet ir dolomitizuota klintis ir dolomitas, ypač jeigu jie turi molingų priemaišų (Vektaris ir Vilkas 2006).

Įvairiose nacionalinėse rekomendacijose ir standartuose cemento kiekis arba Na_2O ekvivalentas cemente konkrečiame betone yra apribotas iki tam tikros vertės, kad nevyktų šarminės korozijos reakcija (Leemann and Lothenbach 2008). Visi betono komponentai prisideda prie bendro šarmų kiekio betone, o iš visų cementų portlandcementyje yra didžiausias kiekis šarmų. Šarmai cemente gali svyruoti nuo 0,2 iki 1,1 %. Jie susitelkia betono porų tirpale (Folliard *et al.* 2003). Cemente šarmų kiekis gali staigiai padidėti nuo 0,4 % iki 1,2 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ekvivalento (Mather 1999). Šarmai sukuria aukštą pH (nuo 13,2 iki 14) porų tirpale, prisijungdami hidroksilo joną (OH^-). Šarminės korozijos sukeltų pažeidimų galima išvengti ne tik kontroliuojant šarmų kiekį cemente, bet ir bendrą šarmų kiekį betono mišinyje (Islam 2003).

Šarmų sumažinimas žemiau 0,60 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ekvivalento neužkirs kelio šarminei korozijai (Islam ir Akhtar 2013). Mažiausias rekomenduojamas šarmų kiekis cemente yra $1,8 \text{ kg/m}^3 \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ekvivalento konstrukcijoms, kuriose didelė šarminės korozijos reakcija kelia didelę grėsmę (Fournier ir Bérubé 2000). Kanados standartų asociacijos rekomenduojamos šarmų kiekio ribos yra nuo 1,8 iki $3,0 \text{ kg/m}^3 \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, atsižvelgiant į užpildų reaktyvumo laipsnį, konstrukcijos eksploatavimo sąlygas ir naudojimo trukmę (Fournier *et al.* 1999, 2000).

Ramachandran taip pat tyrinėjo skirtingos procentinės dalies šarmų cemente poveikį skiedinio sijelių tiesinei plėtrai (Ramachandran 1997). Tyrimas parodė, kad šarminės korozijos sukelta plėtra didėja, didėjant šarmų kiekiui cemente. 1.4 paveiksle pateikta prizmių plėtra (ASTM C 1293), susijusi su šarmų kiekiu cemente. Tyrimų duomenimis, betonas, kuriame yra mažiau nei $3,0 \text{ kg/m}^3 \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, paprastai yra atsparus didelei plėtrai. Tyrėjai išaiškino cemento šarmų įtaką šarminės korozijos reakcijos stiprumui (Touma *et al.* 2001). Jų tyrimo išvadose teigiama, kad labai reaktyvūs užpildai sukėlė plėtrą net esant mažam 0,50 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, o nekenksmingi užpildai nesukėlė reakcijos net tais atvejais, kai $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ekvivalentas cemente buvo 0,90 %. Nustatyta, kad šarmų kiekio cemente pakeitimas neturi įtakos užpildo šarmų ir silicio reaktyvumo lygiui (Islam 2003).

Shon *et al.* (2002) atliko bandymą pagal ASTM C 1260 naudodami 0,51 % ir 0,58 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ cementą bei laikydami bandinius 1 M NaOH, 0,50 M NaOH ir 0,25 M NaOH tirpaluose. Tyrimo rezultatais nustatyta, kad, naudojant mažai šarmų turintį cementą, bandinių plėtra yra mažesnė, nei naudojant daug šarmų turintį cementą (Shon *et al.* 2002).



1.4 pav. Cemento šarmų poveikis plėtrai pagal ASTM C 1293 (Thomas *et al.* 2005)

Fig. 1.4. Effect of cement alkali on expansion according to ASTM C 1293 (Thomas *et al.* 2005)

Cemento smulkumas taip pat turi įtakos šarminės korozijos sukeltai plėtrai. Iš smulkaus cemento šarmai išsiskiria greičiau ir plėtra yra spartesnė. Fournier ir Bérubé (1991) bei Berra *et al.* (1998) nustatė didesnę plėtrą paspartintuoju betono sijos tyrimo metodu ir didžiausias savitojo paviršiaus ploto vertes, išmatuotas Bleino metodu. Jų rezultatai rodo, kad smulkumo poveikis yra ribotas, kai naudojami vidutiniškai reaktyvūs užpildai.

Bektas *et al.* (2008) tyrinėjo skirtingo smulkumo cemento poveikį betono šarminėi korozijai. Cemento šarmų kiekis didelės įtakos skiedinio sijelių plėtrai su vidutiniškai reaktyviais užpildais neturėjo, tačiau turėjo didelę įtaką skiedinio sijelėms su labai reaktyviais užpildais.

1.4.2. Užpildų reaktyvumo įvertinimas

Šarminės korozijos reakcijai betone reikalingas silicio dioksidas arba silikatas atsiranda iš reaktyviųjų užpildų. Silicio dioksidas betone reaguoja su šarminių metalų (natrio ir/arba kalio) hidroksidais ir sudaro šarminį gelį (Islam 2010).

Šarminės korozijos reakcija yra tik vienas iš daugelio veiksnių, visiškai arba iš dalies lemiančių betoninių konstrukcijų irimą ir ankstyvą eksploatacinių savybių praradimą (Fournier *et al.* 2010). Nors faktinė sukelta žala betono konstrukcijoms yra santykinai reta ir atsitiktinė, šarminės korozijos paveiktų betono konstrukcijų savininkai patiria nemažai išlaidų remonto darbams. Ši problema žinoma visame pasaulyje ir aktuali daugelyje šalių.

Šarminės korozijos reakcija priklauso nuo reaktyviųjų užpildų tipo, kiekio, mineralinės ir granuliometrinės sudėties (Shi *et al.* 2015). Nors yra galimybė nustatyti, kokio tipo užpildai gali sukelti šarmų ir užpildų reakciją, neįmanoma prognozuoti, ar tokie užpildai sukels padidėjusią betono plėtrą. Yra apskaičiuotas kritinis kiekvieno tipo užpildo kiekis, kuris sukelia kritinę betono plėtrą, o mažesnis arba didesnis užpildo kiekis nesukelia ryškesnės plėtros (Zhanga *et al.* 1999).

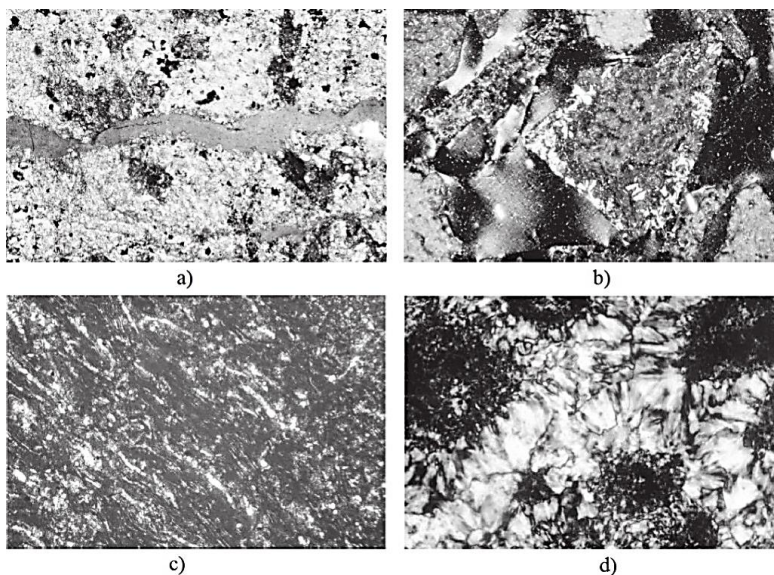
Lietuvoje betono gamybai dažniausiai naudojamas smėlis, žvirgždas ir žvirgždo skalda. Visuose žvyro telkiniuose yra opokos dalelių, kurių sudėtyje yra silikatinų uolienu, ir akytojo titnago turinčio įvairių karbonatų ir silikatinų uolienu (Gumuliauskas *et al.* 2002). Taigi visi Lietuvos žvyro karjerų smulkieji ir stambieji užpildai yra užteršti reaktyviaisiais opoka ir titnagu, kurie intensyviai reaguoja su natrio ir kalio šarmais, esančiais cemento. Opoka yra du kartus reaktyvesnė už titną (Skripkiunas *et al.* 2014).

Reaktyvieji Lietuvos užpildai dažniausiai sudaryti iš žemos temperatūros kristobalito, turinčio adsorbcinio vandens, ir (arba) smulkiakristalės struktūros kvarco mineralų. Betono su reaktyvesnėmis uolienomis (pvz., opoka, sudaryta iš žemos temperatūros kristobalito, turinčio adsorbcinio vandens) plėtimosi deformacijos yra didesnės, lyginant su betonu, pagamintu naudojant tą patį kiekį

mažesnio reaktyvumo uolienu (pavyzdžiui, titnago, sudaryto iš smulkiakristalio kvarco) (Gumuliauskas *et al.* 1996).

Vykstant šarminės korozijos reakcijai, silicio dioksidas reaguoja su šarminiais tirpalais ir galiausiai juose ištirpsta. Tačiau įprastose betono naudojimo aplinkose normaliomis atmosferos sąlygomis ir numatytą betono konstrukcijos naudojimo laiką dauguma silicio dioksido formų yra stabilios (Newman and Choo 2003).

Silicio dioksido reaktyvumas priklauso nuo didelio vidinio paviršiaus ploto ir/arba tam tikro atsitiktinio atomų išsidėstymo laipsnio; iš dalies ar menkai kristalizuoto smulkaus silicio dioksidas yra labiau entropiškas lyginant su grynai amorfinė medžiaga. Reaktyviausias natūralus silicio oksidas yra opalas, kurio pasaulyje mažai randama, tai hidroksilo grupės turintis nekristalinės ir labai netvarkingos formos silicio dioksidas, susijęs su kristobalitu. Taip pat labai reaktyvus yra daug silicio turintis vulkaninis stiklas, ypač jo visiškai nekristaliniai ekvivalentai. Reaktyvios yra įvairios smulkiagrūdės silicio dioksido formos, įskaitant tridimitą, kristobaltą, chalcedoną, kriptokristalinį ir mikrokristalinį kvarcą (1.5 pav.).



1.5 pav. Reaktyviųjų silicio dioksido formų mikroskopinės nuotraukos: a) opalo linijos klintyje; b) tridimito kristalai šalia kristobalito dalelių; c) vulkaninis stiklas riolite (juodoji masė yra stiklas); d) perkristalizuotas kvarcas išilgai dalelių kraštų metakvarcite (Newman and Choo 2003)

Fig. 1.5. Microscopy images of reactive forms of silica fume: a) opal vein in limestone, b) tridymite crystals bordering a cristobalite particle, c) volcanic glass in rhyolite (the black groundmass is glass); d) recrystallized quartz along the grain boundaries in a meta – quartzite (Newman and Choo 2003)

Jungtinėje Karalystėje ir kitose šiaurės Europos vietose pats reaktyviausias yra titnagas (geležies skalūnas), kurį sudaro kriptokristalinis ir mikrokristalinis kvarcas su chalcedono intarpais. Jungtinėje Karalystėje pats reaktyviausias užpildas yra maltas pilkas smiltainis, kuriame dalis molingos uolienos matricos kristalizavosi į mikrokristalinį silicio dioksidą (Newman and Choo 2003). Šios reaktyvios silicio dioksido formos sudaro didelę arba mažą dalį uolienos. Taigi reaktyvaus silicio dioksido forma ir kiekis užpilduose gali labai skirtis (Newman ir Choo 2003). Jau ankstyvuose šarminės korozijos tyrimuose buvo nustatyta, kad galimai reaktyvių užpildo dalelių ir šarminės korozijos reakcijos stiprumo bei plėtros santykis yra susijęs. Daugeliu atvejų didžiausia plėtra atsirasdavo esant santykinai mažam reaktyvios medžiagos užpilde kiekiui. Šis kritinis santykis pavadintas *pesimumu*. Įvairiems užpildų tipams nustatyta plati *pesimumo* verčių skalė, pradedant keliais procentais opalo atveju, toliau 15–35 % titnago uolienoms ir baigiant 100 % (nepešimumas) smulkintam sustiklėjusiam andezitui (Barnard 1991).

Žalingai reaktyvios uolienos, mineralinės ir sintetinės medžiagos pateikiamos 1.2 lentelėje (ACI 201 1992). Šarminės korozijos reakcija priklauso nuo reaktyviųjų užpildų tipo, nes kai kurie užpildai reaguoja greitai, o kiti lėčiau. Daugelyje uolienų yra silicio oksido, tačiau ne visi silicio turintys užpildai sukelia šarminę koroziją. Mineralinis kvarcas yra stabilus, o mineralinis opalas – reaktyvusis. Šį skirtumą lemia mikrostruktūra. Mineralinio opalo struktūra yra labai netvarkinga, todėl aukšto pH aplinkoje jis yra jautrus šarmams.

Reaktyviaisiais laikomi šie silicio mineralai: opalas, tridimitas, kristobalitas, vulkaninis stiklas, kriptokristalinis kvarcas ir intrakristališkai deformuotas kvarcas, kurių gali būti tokiose uolienose: skalūnuose, smiltainiuose, silifikuotose karbonatinėse uolienose, geležies skalūnuose, žvyruose, kvarcituose, kvarco – arenituose, gneisuose, argilituose, granituose, pilkajame smiltainyje. Reaktyvieji mineralai uolienose nustatomi petrografinio tyrimo metodais.

Reaktyviųjų užpildo dalelių dydis turi didelę įtaką reakcijos greičiui ir betono plėtrai. Diamond ir Thaulow (1974) teigė, kad 20–30 μm dydžio užpildo dalelės sukelia didesnę plėtrą nei stambesnės dalelės. Be to, taip pat didėja reakcijos greitis. Skiedinio su 20–30 μm dydžio užpildo dalelėmis plėtra baigėsi po kelių mėnesių. Bandinių su to paties tipo reaktyviaisiais ir stambesniaisiais 125 μm užpildais plėtra buvo ilgesnė ir tolydesnė. Hobbs ir Gutteridge (1979) taip pat tyrinėjo dalelių dydžio įtaką. Jie naudojo opalo turinčių uolienų užpildus, kurių dalelių dydis svyravo nuo 150 μm iki 4,8 mm. Išvadose teigiama, kad plėtra didėja mažėjant dalelių dydžiui. Šis poveikis ypač išryškėjo, kai opalo turinčios uolienos sudarė 4–6 % viso užpildų kiekio.

Kuroda *et al.* (2004) nustatė, kad plėtra didėja mažėjant užpildo dalelėms. Jie tyrė bandinius, laikomus NaOH tirpale autoklave. Nustatyta, kad bendras reaktyviojo užpildo paviršiaus plotas ir plėtra yra tiesiogiai susiję, neatsižvelgiant į dalelių dydį. Jin *et al.* (2000) bei Shayan ir Xu (2004) įrodė, kad betono, kuriame

kaip užpildas naudojamas reaktyvusis perdirbtas stiklas, plėtrą galima labai sumažinti, susmulkinus stiklą iki tam tikro dydžio dalelių.

1.2 lentelė. Žalingos reaktyviosios uolienos, mineralinės ir sintetinės medžiagos (ACI 201 komitetas (1992))

Table 1.2. Deleteriously reactive rocks, minerals and synthetic substances (ACI Committee 201, 1992)

Reaktyvioji medžiaga (mineralas)	Cheminė sudėtis	Fizinės savybės
Opalas	$\text{SiO}_2/\text{nH}_2\text{O}$	Amorfinis
Chalcedonas	SiO_2	Nuo mikrokristalinio iki kriptokristalinio, skaidulingas
Tam tikros kvarco formos	SiO_2	Nuo mikrokristalinio iki kriptokristalinio, kristalinis, bet intensyviai suskaidytas, intrakristališkai deformuotas ir/arba su tarpais
Kristobalitas	SiO_2	Kristalinis
Tridimitas	SiO_2	Kristalinis
Riolito, dacito, lacito, andezito stiklo arba kriptokristalų devitrifikacijos produktai	Turintis silicio su mažiau Al_2O_3 , Fe_2O_3 , žemės šarminių metalų ir šarmų	Stiklas arba kriptokristalinė medžiaga kaip vulkaninių uolienų matrica arba tarpai tufe
Sintetinis silicio stiklas	Turintis silicio su mažiau Al_2O_3 ir/arba kitų medžiagų	Stiklas

1.4.3. Mineralinių priedų poveikis

Pucolaninių medžiagų naudojimas, siekiant išvengti betono šarminės korozijos, plačiai tyrinėjamas nuo 1950 m. Po to, kai Stantonas pirmą kartą aprašė šarminę koroziją 1940 m., buvo atlikta daug tyrimų apie natūralių pucolanų, degtų pucolanų, lakiųjų pelenų, aukštakrosnių šlako ir silicio dioksido mikrodulkių betone poveikį šarminės korozijos mažinimui arba užkirtimui. Šių medžiagų gebėjimo sumažinti šarminės korozijos vyksmą mechanizmas kinta atsižvelgiant į medžiagų tipą, kokybę ir kiekį. Nors šis mechanizmas nėra iki galo išaiškintas, šarminės korozijos sumažėjimas dėl pucolaninių medžiagų paprastai priskiriamas mažesniai pralaidumui ir dėl to mažesniai jonų mobilumui, mažesniai porų tirpalo pH, mažesniai pucolaninės reakcijos produktų kiekiui. Pucolaninės reakcijos sumažina kalcio hidroksido kiekį, taip sumažindamos porų tirpalo pH. Be to, dėl pucolaninių reakcijų susidariusios C–S–H fazės mažesnis kalcio oksido ir silicio

santykis padidina gebėjimą prijungti šarmus. Abu šie reiškiniai mažina porų tirpalo pH (Massazza 1981). Šarminės reakcijos poveikį gali susilpninti ir mineraliniai priedai, pakeičiantys dalį cemento. Paprastai tos medžiagos yra mažiau reaktyvios nei cementas ir laikui bėgant išskiria mažiau šarmų. Taigi, esant nurodytam vandens ir cemento santykiui, bendra šarmų koncentracija porų tirpale yra mažesnė betone, pagamintame iš cementų mišinio (Glasser 1992).

Monteiro *et al.* (1997) tyrė skiedinio siją, pagamintą iš dviejų cementų su skirtingais kiekiais trijų natūralių pucolaninių medžiagų, lakiaisiais pelenais ir aukštakrosnių šlaku. Naudojamų cementų ir mineralinių priedų bendras šarmų kiekis buvo atitinkamai 1,37 %, 0,68 %, 0,73 %, 0,10 %, 4,58 %, 1,85 % ir 0,54 %. Bandymai buvo atlikti pagal ASTM C 1260 metodą. Visi trys natūralūs pucolaniniai priedai, kurių buvo naudojama 20 % nuo daug šarmų turinčio cemento masės, po 30 dienų sumažino betono plėtrą nuo 0,15 % iki 0,1 %. Nors natūraliuose pucolaniniuose prieduose buvo skirtingi šarmų kiekiai (0,10 %, 0,73 % ir 4,58 %), jų poveikis plėtrai mažai kuo skyrėsi. Tai paaiškinama tuo, kad iš pucolaninių priedų išsiskiria nedaug šarmų. Didinant natūralių pucolanų kiekį, plėtra labai sumažėja. Pakeitus 15 % šarminio cemento lakiaisiais pelenais, šarminės korozijos sukelta plėtra nesumažėjo. Vis dėlto bandinių, kurių sudėtyje buvo 25 % ir 30 % lakiųjų pelenų, plėtra sumažėjo reikšmingai (atitinkamai 0,08 % ir 0,05 %). Panašiai, naudojant 50 % aukštakrosnių šlako, plėtra mažėjo nedaug, tačiau geresnių rezultatų buvo gauta į mišinį įdėjus 60 % ir 70 % aukštakrosnių šlako. Skirtingi aukštakrosnių šlako kiekiai buvo naudojami su mažiau šarmų turinčiu cementu. Cementą keičiant mažesniu nei 45 % aukštakrosnių šlako kiekiu, plėtra nesumažėjo, tačiau, įdėjus daugiau nei 55 % aukštakrosnių šlako, po 30 dienų plėtros beveik nebuvo. Ryškus plėtros sumažėjimas nuo maždaug 0,1 % iki mažiau nei 0,03 %, padidinus šlako kiekį nuo 45 % iki 55 %, aiškinamas dvigubo sluoksnio teorija. Susidariusio šarmų ir silicio gelio cheminė sudėtis nustatoma tiriant šešis skirtingus skiedinio mišinius rentgeno spindulių energijos dispersiniu spektrometru. Pagal dvigubo sluoksnio teoriją didesnė plėtra stebima, kai difuzijos sluoksnyje vienvalenčių jonų (Na^+ ir K^+) yra daugiau nei divalenčių jonų (Ca^{2+} ir Mg^{2+}).

Tyrimais su vulkaniniu tufu (Andic-Cakır 2007), pumicitu (Cook 1986), perlitu (Bektaş *et al.* 2005), metakaolinu (Ramlochan *et al.* 2000) ir ceolitu (Naiqian *et al.* 1998) nustatyta, kad šios pucolaninės medžiagos sumažina šarminės korozijos sukeltą plėtrą. Kuo smulkesni pucolaniniai priedai, tuo didesnis jų efektyvumas.

Mažai kalcio oksido turintys pelenai taip pat turi panašų poveikį mažinant šarminės korozijos sukeltą plėtrą. Stark (1978), Nixon ir Gaze (1983), Nixon *et al.* (1986) ir Stark *et al.* (1993) nustatė, kad 15–30 % cemento pakeitus mažai kalcio oksido turinčiais lakiaisiais pelenais, šarminės korozijos sukelta plėtra labai sumažėja. Tačiau, naudojant 5–10 % lakiųjų pelenų, plėtra padidėja, lyginant su betonu be lakiųjų pelenų priedo (Dunstan 1981).

Yra priimta, kad tinkamai naudojami lakieji pelenai sumažina šarminės korozijos sukeltą plėtrą. Keluose tyrimų straipsniuose bandoma susieti šarminės korozijos mažinantį lakiųjų pelenų poveikį su jų chemine sudėtimi. Shehata ir Thomas (2000) atliktame plačiame tyrime buvo naudojama 18 rūšių lakiųjų pelenų, kuriuose CaO kiekis svyravo nuo 5,57 % iki 30 %, o $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ekvivalentas – nuo 0,56 % iki 8,73 %. Taikydami paspartintąjį betono sijos tyrimo metodą autoriai padarė išvadą, kad lakieji pelenai mažina šarminės korozijos sukeltą plėtrą ir ji dar mažėja didinant lakiųjų pelenų kiekį. Plėtra didėjo, didėjant kalcio oksido arba šarmo kiekiui arba mažėjant silicio kiekiui lakiuosiuose pelenuose. Tai reiškia, kad reikia didesnio minimalaus lakiųjų pelenų kiekio plėtrai kontroliuoti, kai didėja kalcio oksido arba šarmo kiekis arba mažėja silicio kiekis.

Tyrėjai (Malvar and Lenke 2006) bandymuose pagal ASTM C 1260 metodiką ištyrė skirtingų rūšių lakiuosius pelenus ir 5 skirtingus cementus. 14 lakiųjų pelenų buvo F klasės, 16 – C klasės, o vienas – nei F, nei C klasės. Du cementai turėjo daug šarmų, kiti du – mažiau ir vienas – pusiau šarminis.

Atlikę išsamius statistinius palyginimus Malvar ir Lenke (2006) pasiūlė lygtį, kuri leistų nustatyti minimalų žinomos sudėties lakiųjų pelenų kiekį (WFA), kuris sukeltų 0,08 % plėtrą dėl šarminės korozijos pagal ASTM C 1260 metodiką.

Naudoti susmulkinti lakieji pelenai gauti iš šiluminės elektrinės. Betono su lakiaisiais pelenais, kurių vidutinis dalelių dydis buvo didesnis nei 10 μm , plėtros eksponentinių lygčių sprendiniai gerai koreliavo su CaO , SiO_2 , $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SO}_3$, $\text{SiO}_{2\text{eq}}$. Nustatyta smulkesnių lakiųjų pelenų (vidutinis dalelių dydis mažesnis nei 10 μm) plėtros tiesinė priklausomybė nuo CaO , $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SO}_3$ ir CaO_{eq} kiekio ir logaritminė priklausomybė nuo SiO_2 , $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ir $\text{SiO}_{2\text{eq}}$ pelenuose. Visų lakiųjų pelenų, kurių dalelių dydis mažesnis nei 5 μm plėtros riba buvo mažesnė nei 0,10 %. Tai reiškia, kad labai smulkūs lakieji pelenai labai veiksmingai mažina šarminę koroziją (Venkatanarayanan ir Rangaraju 2013).

Malvar ir Lenke nagrinėjo Wright *et al.* (2014) pasiūlytą modelį, tirdami betoną su smulkinto stiklo užpildais. Modelis įvertintas kaip konservatyvus. Jie pasiūlė peržiūrėti a_1 ir a_4 konstantas. Reikia paminėti, kad šis tyrimas buvo atliekamas laboratorijoje, naudojant perdirbto stiklo smėlį, kuris retai kada (jei kada nors iš viso) naudojamas realiuose betonuose.

Aukštakrosnių šlakas yra kitas mineralinis priedas, mažinantis šarminės korozijos plėtrą. Nors kai kurie šlakai turi didelį kiekį šarmų, ne daugiau kaip 50 % bendro šarmų kiekio efektyviai prisideda prie korozijos reakcijos slopinimo, o kita dalis lieka stiklo fazėje (Hobbs 1988; Andic-Cakır 2007). Eksperimentiniame tyrime pagal ASTM C 441 metodiką su bandiniais, kuriuose pirekso stiklas buvo naudojamas kaip reaktyvusis užpildas, nustatyta, kad aukštakrosnių šlakas labai sumažina šarminės korozijos plėtrą. Aukštakrosnių šlako efektyvumas padidėja didinant jo kiekį (Buck 1987).

Thomas ir Innis (1998) nustatė, kad 50 % (pagal masę) aukštakrosnių šlako betono prizmėse su reaktyviojo silicio oksido turinčiais kalkakmenio užpildais sumažina šarminės korozijos plėtrą iki mažiau nei 0,04 %. Tuo pačiu tyrimu nustatyta, kad 35 % aukštakrosnių šlako yra pakankamas kiekis dėti į betoną su smiltainio užpildu.

Kwon (2005) tyrė šarmų ir užpildų reakciją mažinantį aukštakrosnių šlako poveikį didelio stiprumo betone ir nustatė, kad, pakeitus 30 % cemento aukštakrosnių šlako priedu, labai sumažėja bendras šarmų kiekis betone.

Silicio dioksido mikrodulkės taip pat yra veiksmingas priedas, didinantis betono atsparumą šarminei korozijai. Betono plėtrai kontroliuoti naudojamas silicio dioksido mikrodulkių kiekis priklauso nuo šarmų kiekio betone. Paprastai laikoma, kad 5–12 % silicio dioksido mikrodulkių yra pakankama (Thomas 2013).

Buvo tiriami betono kernai, paimti iš Islandijoje stovinčių statinių, ir nustatyta, kad, esant tik 5 % (nuo cemento masės) silicio dioksido mikrodulkių, betone susidaro daug mažiau šarminio gelio, lyginant su betonais be silicio dioksido mikrodulkių (Gudmundsson and Olafsson 1999). Durand *et al.* (1987) naudojo 5 %, 10 % ir 15 % (nuo cemento masės) silicio dioksido mikrodulkių betone su reaktyviojo agrilito turinčiais užpildais ir nustatė, kad plėtra atitinkamai sumažėjo 4 %, 68 % ir 83 %. Trijų komponentų mišiniuose su aukštakrosnių šlakais arba lakiaisiais pelenais silicio dioksido mikrodulkės efektyviai kontroliuoja šarminės korozijos plėtrą net esant nedideliame (apie 4–6 %) silicio dioksido mikrodulkių kiekiui (Thomas 2013). Nors mineraliniai priedai mažina šarminės korozijos poveikį, tačiau jie efektyviai nemažina šarmų ir karbonatų reakcijos plėtros (ACI 221 1998).

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Literatūroje plačiai aprašomas betone vykstantis šarminės korozijos mechanizmas, tačiau net po daugiau nei 60 metų tyrimų vis dar nerasti būdai, kaip iki nereikšmingo dydžio sumažinti šarminės korozijos poveikį betonui.
2. Tyrimų metodikų, skirtų betono šarminei korozijai tirti, yra daugybė, tačiau standartizuotų metodikų, kurios leistų tiksliai nustatyti ir prognozuoti betono šarminės korozijos poveikį, nėra.
3. Mineraliniais priedais modifikuojant betoną, didėja ne tik fizikinių ir mechaninių savybių reikšmės, bet ir atsparumas betono šarminei korozijai, tačiau būtina parinkti ir įvertinti ribinį priedų kiekį, naudojamą betono mišinio sudėtyje.

4. Dauguma betono smulkiųjų ir stambiųjų užpildų yra užteršti reaktyviuoju SiO_2 . Todėl, vertinant užpildų įtaką betono šarminei korozijai, privaloma atsižvelgti į nacionalinį ar net regioninį užpildų užterštumą reaktyviosiomis dalelėmis.

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Šarminės korozijos atžvilgiu įvertinti sudėtinių cementų poveikį betonui, turinčiam vietinių reaktyviųjų užpildų.
2. Ištirti aktyviųjų mineralinių priedų poveikį betono savybėms ir nustatyti priklausomybę tarp jų kiekio, ultragarso impulso sklaidimo greičio pokyčio bei plėtros su užpildais, užterštais reaktyviosiomis dalelėmis.
3. Įvertinti šarminės korozijos proceso poveikį betono struktūrai ir savybėms bandymų trukmę pratęsiant nuo 14 iki 56 parų.
4. Pateikti rekomendacijas betono šarminei korozijai nustatyti ir mažinti, naudojant mineralinius priedus.

Žaliavų ir betono šarminės korozijos tyrimų metodikų apžvalga

Šiame skyriuje apžvelgiamos darbe naudotos žaliavos, pateikiamos jų savybės ir charakteristikos. Pateikiamos mišinių sudėtys, aprašomas bandinių formavimas ir jų paruošimas bandymams. Detaliai apžvelgiamos tyrimų metodikos ir įranga.

Šio skyriaus medžiaga paskelbta keturiuose straipsniuose (Rutkauskas *et al.* 2016, 2017c; Rutkauskas ir Girskas 2015; Rutkauskas ir Nagrockienė 2015) ir pristatyta trijose mokslinėse konferencijose.

2.1. Naudotos medžiagos

Atliekant tyrimus buvo naudojami keturi mineraliniai priedai: SiO₂ mikrodulkės (skysta amorfinio silicio dioksido mikrodulkių suspensija), gamtinis ceolitas, aukštakrosnių šlakas ir lakieji pelenai. Šie mineraliniai priedai yra vieni plačiausiai naudojamų betono gamyboje.

Tyrimams kaip rišamoji medžiaga buvo naudoti cementai be mineralinių priedų CEM I 42,5 R ir mažasarmis cementas CEM I 42,5 N-SR. Taip pat du sudėtiniai cementai, kurių sudėtyje yra iki 20 % mineralinių priedų: šlakinis cementas CEM II/A-S 42,5 N ir cementas su pelenų priedu CEM II/A-V 52,5 N. Cementai atitiko EN 1974-1 standarto reikalavimus.

Cementų fizikinės ir mechaninės savybės pateikiamos A priede.

Cementų CEM I 42,5 R, CEM I 42,5 N-SR, CEM II/A-S 42,5 N ir CEM II/A-V 52,5 N cheminės sudėtys pateikiamos 2.1 lentelėje, miltelių pavidalo mineralinių priedų (gamtinio ceolito, aukštakrosnių šlako ir lakiųjų pelenų) cheminės sudėtys – 2.2 lentelėje.

2.1 lentelė. Cementų cheminės sudėtys

Table 2.1. Chemical composition of cements

Cheminė sudėtis, %				
Elementas	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 N-SR	CEM II/A-S 42,5 N	CEM II/A-V 52,5 N
SiO ₂	20,76	21,2	22,3	21,5
Al ₂ O ₃	6,12	3,5	5,1	6
Fe ₂ O ₃	3,37	4,1	2,9	3,4
CaO	63,5	63,2	60,5	58
K ₂ O	1	0,6	0,73	–
MgO	–	1,7	2,5	3
SO ₃	0,8	2,7	2,8	3,45
Na ₂ O	0,3	0,17	0,14	–
Na ₂ O _{eq}	0,8	0,58	0,4	0,6
Cl	–	0,02	0,06	0,07
Kiti	3,35	2,23	1,78	3,58

Naudotų cementų cheminė sudėtis (2.1 lentelė) rodo, kad didžiausias šarmų kiekis (Na₂O_{eq}) yra cemente CEM I 42,5 R be mineralinių – 0,8 %, o mažiausias cemente CEM I 42,5 N-SR – 0,58 %. Cementuose CEM I 42,5 N-SR ir CEM II/A-S 42,5 N šarmų kiekis yra apie 0,6 %. Iš literatūros analizės žinoma, kad šarmų kiekis daro didelę įtaką betono šarminei korozijai.

Kaip matoma iš 2.2 lentelės, didžiausia SiO₂ koncentracija yra gamtiniame ceolite – 68,15 %, o mažiausiai SiO₂ aukštakrosnių šlake – 35,1 %. Lakiuosiuose pelenuose SiO₂ koncentracija yra 49,8 %. Gamtiniame ceolite ir lakiuosiuose pelenuose antras pagal kiekį junginys yra Al₂O₃, kurio yra 12,18 % ir 19,1 %. Pagal cheminę sudėtį aukštakrosnių šlake dominuojantis elementas yra kalcio oksidas (CaO), kurio yra 41,2 %.

Kaip mineralinis priedas naudota skysta amorfinio silicio dioksido mikrodulkių suspensija. Labai mažas silicio dioksido mikrodulkių dalelių dydis suspensijoje leidžia užpildyti net labai mažus tarpus tarp cemento dalelių. Dėl to mišinys yra tankesnis ir kompaktiškesnis. Skystos amorfinio silicio dioksido mikrodulkių suspensijos savybės pateikiamos B priede, o cheminė sudėtis – 2.3 lentelėje.

2.2 lentelė. Mineralinių priedų cheminė sudėtis**Table 2.2.** Chemical composition of mineral additives

Cheminė sudėtis	Gamtinis ceolitas, %	Aukštakrosnių šlakas, %	Lakieji pelenai, %
SiO ₂	68,15	35,10	49,80
Al ₂ O ₃	12,18	5,38	19,10
Fe ₂ O ₃	1,30	0,43	7,03
CaO	3,95	41,20	6,92
K ₂ O	2,80	0,41	1,82
MgO	0,90	4,13	1,58
P ₂ O ₅	–	0,36	1,41
SO ₃	–	1,68	1,02
TiO ₂	0,20	0,27	1,00
Na ₂ O	0,75	0,49	0,79
BaO	–	–	0,28
SrO	–	0,07	0,18
MnO	–	0,22	0,06
ZrO ₂	–	0,02	0,05
ZnO	–	–	0,02
WO ₃	–	–	0,02
NiO	–	–	0,02
CuO	–	–	0,01
Cl	–	0,04	–
Kiti	9,77	10,20	8,89

2.3 lentelė. Skystos amorfinio silicio dioksido mikrodulkių suspensijos cheminė sudėtis**Table 2.3.** Liquid suspension of amorphous silica fume chemical composition

Cheminė sudėtis									
SiO ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	CaO, %	MgO, %	K ₂ O, %	Na ₂ O, %	Na ₂ O _{eq} , %	SO ₃ , %	Kaitmenys, %
93,35	0,92	0,71	0,69	0,72	0,86	0,33	0,85	0,13	1,44

Tyrimams atlikti naudojami smėlis ir žvirgždas iš keturių žvyro karjerų. Pasirinktų žvyro karjerų žemėlapis pateiktas 2.1 paveiksle.

Smėlis 0/4 fr. naudojamas iš pirmojo, trečiojo ir ketvirtojo karjerų. Žvirgždas tirtas iš visų keturių karjerų: pirmojo karjero – žvirgždas (frakcija 4/16), antrojo karjero – žvirgždas (frakcija 8/16), trečiojo karjero – žvirgždas (frakcija 8/16) ir ketvirtojo karjero – žvirgždo skalda (frakcija 4/16).



2.1 pav. Smėlio ir žvirgždo karjerų žemėlapis

Fig. 2.1. Map of sand and gravel quarries

Užpildų dalelių ir piltiniai tankiai pateikiami C priede. Naudotų karjerų smėlių bei žvirgždų mineralinė ir petrografinė sudėtis pateikta 2.4 ir 2.5 lentelėse.

Iš 2.4 lentelės matoma, kad visų smėlių sudėtyje daugiausia yra kvarco, kuris sudaro nuo 57,8 % iki 62,3 %. Žinome, kad kvarcą daugiausia sudaro silicio dioksidas, kuris reaguodamas su šarminiais elementais, esančiais cemente, sukelia betono šarminę koroziją. Didžiausią dalį (62,3 %) sudaro kvarcas smėlyje iš ketvirtojo karjero.

2.4 lentelė. Tyrimams naudotų karjerų smėlio mineralinė ir petrografinė sudėtis

Table 2.4. Mineral and petrographic composition of sand from used quarries

Mineralinė ir petrografinė sudėtis	Pirmojo karjero smėlis fr. 0/4	Trečiojo karjero smėlis fr. 0/4	Ketvirtojo karjero smėlis fr. 0/4
Kvarcas	60,4 %	57,8 %	62,3 %
Lauko špatai	12,1 %	14,2 %	13,0 %
Karbonatai	15,9 %	21,5 %	14,2 %
Žėrutis	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Amfibolai	—	1,2 %	2,6 %
Kristalinės uolienos	7,5 %	5,2 %	7,8 %
Tamsieji mineralai	4 %	—	—

Iš 2.5 lentelėje pateiktų duomenų matoma, kad tirtus žvirgždo užpildus daugiausiai sudaro klintys (32,0–51,8 %) ir granitas (25,2–39,6 %), kuriuos sudaro mineralai, turintys silicio dioksido. Taip pat yra kvarco (0,8–4,3 %), kurio didžiąją dalį sudaro silicio dioksidas.

Betono mišinio vienodam slankumui naudojamas superplastiklis, kurio charakteristikos pateikiamos D priede.

2.5 lentelė. Tyrimams naudotų karjerų žvirgždų mineralinė ir petrografinė sudėtis

Table 2.5. Mineral and petrographic composition of gravel from used quarries

Mineralinė ir petrografinė sudėtis	Pirmojo karjero žvirgždas fr. 4/16	Antrojo karjero žvirgždas fr. 8/16	Trečiojo karjero žvirgždas fr. 8/16	Ketvirtojo karjero žvirgždo skalda fr. 8/16
Klintis	32,7 %	42,5 %	51,8 %	32,0 %
Granitas	29,4 %	39,6 %	35,7 %	25,2 %
Dioritas	2,3 %	0,7 %	–	1,0 %
Gabras	2,0 %	1,4 %	1,6 %	–
Porfyritas	1,9 %	–	0,8 %	3,9 %
Kvarcas	3,0 %	3,6 %	0,8 %	1,9 %
Lauko špatai	1,2 %	4,3 %	0,8 %	3,9 %
Dolomitas	–	7,9 %	8,5 %	30,1 %
Pilkasis smiltainis	1,5 %	–	–	1,0 %
Arkožė	–	–	–	1,0 %

2.2. Mišinių sudėtys

Atsižvelgiant į gamintojų ir tiekėjų rekomendacijas dėl mineralinių priedų naudojimo betono mišiniuose ir „RILEM AAR-2“ tyrimų metodiką, buvo formuojamos betono mišinių sudėtys, pateikiamos 2.6 lentelėje.

2.6 lentelė. Betono mišinių sudėtys

Table 2.6. Concrete composition

Mine-ralinis priedas	Mineralinio priedo kiekis, % (nuo cemento kiekio)	Cementas, %	Užpildas, %	Van-duo, %	Minera-linis priedas, %	V/R	Plastik-lis, % (nuo cemento kiekio)	Slanku-mas, mm
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Kontroliniai bandiniai be mineralinių priedų	0	26,88	60,48	12,63	0,00	0,47	0–0,10	205
2. Lakieji pelenai	15	22,85	60,48	12,63	4,03	0,47	–	210
	25	20,16	60,48	12,63	6,72	0,47	0,05	213
	35	17,47	60,48	12,63	9,41	0,47	0,10	217
	45	14,79	60,48	12,63	12,10	0,47	0,10	208
	55	12,1	60,48	12,63	14,79	0,47	0,15	220
	65	9,41	60,48	12,63	17,47	0,47	0,15	218

2.6 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3. Aukštakrosnių šlakas	15	22,85	60,48	12,63	4,03	0,47	–	207
	25	20,16	60,48	12,63	6,72	0,47	0,05	209
	35	17,47	60,48	12,63	9,41	0,47	0,10	216
	45	14,79	60,48	12,63	12,10	0,47	0,10	209
	55	12,1	60,48	12,63	14,79	0,47	0,10	210
	65	9,41	60,48	12,63	17,47	0,47	0,15	212
4. Silicio dioksido mikrodulkių suspensija	2,5	26,21	60,48	12,63	0,67	0,47	0,20	219
	5	25,54	60,48	12,63	1,34	0,47	0,30	215
	7,5	24,87	60,48	12,63	2,02	0,47	0,60	205
	10	24,19	60,48	12,63	2,69	0,47	0,80	205
5. Gamtinis ceolitas	2,5	26,21	60,48	12,63	0,67	0,47	–	213
	5	25,54	60,48	12,63	1,34	0,47	–	210
	7,5	24,87	60,48	12,63	2,02	0,47	0,05	220
	10	24,19	60,48	12,63	2,69	0,47	0,10	214
	12,5	23,52	60,48	12,63	3,36	0,47	0,10	206
	15	22,85	60,48	12,63	4,03	0,47	0,10	205

Visų mišinių vandens ir rišamosios medžiagos santykis (V/R) yra vienodas – 0,47. Betono mišinių slankumas pagal „RILEM AAR-2“ tyrimų metodiką turi būti nuo 205 iki 220 mm. Vienodam betono mišinio slankumui pasiekti naudojamas superplastiklis.

2.3. Betono bandinių formavimas

Betono bandiniams ruošti naudojamos išdžiovintos medžiagos. Užpildai, cementas ir mineraliniai priedai dozuojami pagal masę, o vanduo – pagal tūrį. Betono mišiniai maišomi priverstinio maišymo maišykle, maišymo trukmė – 2 min. Buvo maišomi skirtingų sudėčių betono mišiniai, kurie modifikuojami skirtingais keturių rūšių mineralinių priedų kiekiais nuo cemento masės.

Nustačius cemento tešlų slankumus, buvo formuojamos betono sijelės (40×40×160 mm), kurios pagal tyrimų metodikas reikalingos bandinių fizikinėms ir mechaninėms savybėms nustatyti bei šarminės korozijos tyrimams. Bandiniai tankinami vibruojant ant vibracinės aikštelės 20±2 s. Formose bandiniai laikomi 24 val. 20±2 °C temperatūros aplinkoje, paskui išformuojami ir 6 arba 27 paras 20±2 °C temperatūroje kietinami vandenyje. Kita dalis bandinių, skirtų šarminės korozijos tyrimams, po 24 val. kietinimo 20±2 °C temperatūros aplinkoje perkeliama į klimatinę kamerą, kurioje vykdomi bandinių šarminės korozijos tyrimai pagal plėtras.

2.4. Tyrimų metodikos

Mineralinių priedų cheminė analizė atlikta rentgeno spinduliuotės fluorescensiniu spektrometru „Bruker X-ray S8 Tiger WD“. Naudotas rodžio vamzdelis, anodo įtampa U_a iki 60 kV, srovės stipris I iki 130 mA. Presuoti bandiniai buvo matuoti helio atmosferoje.

Mineralinių priedų fazinė analizė atlikta naudojant rentgeno spindulių difraktoметрą SmantLab (Rigaku) su 9 kW besisukančio Cu anodo rentgeno spindulių vamzdžiu. Rentgenogramos užrašytos 2θ kampų $5\text{--}75^\circ$ intervale, matavimų žingsnis – 0,02 laipsnio, detektoriaus judėjimo greitis – 1 laipsnis per minutę. Rezultatų analizei naudota PDF -4+ (2016 m) kristalinių junginių duomenų bazė.

Medžiagų smulkumas nustatomas taikant oro pralaidumo metodą (Blaino metodas) pagal LST EN 196-6:2010. Savitasis paviršius apskaičiuojamas nustatant žinomo oro kiekio perėjimo trukmę t per žinomo poringumo tiriamosios medžiagos sluoksnį.

Betono bandinių ir mineralinių priedų mikrostruktūra tiriama naudojant „SEM JEOL JSM-7600F“ skenuojančiosios elektroninės mikroskopijos (SEM) prietaisą. Elektroninės mikroskopijos parametrai: 10 kV ir 20 kV įtampa, atstumas iki bandinio paviršiaus – 7–10 mm. Mikrostruktūros ypatumai identifikuoti tiriant bandinių skėlimo paviršių. Vaizdas kuriamas registruojant antrinių elektronų signalą. Prieš atliekant tyrimą, skėlimo paviršius padengiamas plonu aukso sluoksniu, vakuume garinant aukso elektrodą „QUORUM Q15OR ES“ prietaisu. Tiriamųjų medžiagų bandiniai fotografuojami skaitmeniniu fotoaparatu „Sony ILCE 5000“.

Gamtinio ceolito ir lakiųjų pelenų granuliometrinė sudėtis nustatyta lazeriniu granuliometru „Cilas 1090 LD“. Kaip dispersinė terpė naudotas vanduo, o kietosios medžiagos kiekis suspensijoje sudarė 12–14 %. Dalelių dydis išmatuotas 0,01–500 μm intervalu. Aukštakrosnių šlako granuliometrinė sudėtis nustatyta naudojant „Haver EML 200“ skaitmeninę sietų purtyklę, sietų komplekto akučių dydžiai: 4; 2,8; 2; 1,4; 1; 0,5; 0,355; 0,25; 0,14; 0,18; 0,125; 0,09; 0,063; 0,045; <0,045 mm.

Ultragarso sklaidimo trukmė bandiniuose nustatyta prietaisu „Pundit 7“ (keitiklių dažnis – 54 kHz) ir apskaičiuotas ultragarso impulso sklaidimo greitis (V_{UIG} , m/s) pagal formulę:

$$V_{UIG} = \frac{l}{\tau}, \quad (2.1)$$

čia l – bandinio ilgis, m; τ – signalo sklaidimo laikas, s.

Pagrindinės sukietėjusių betonų fizikinės ir mechaninės charakteristikos nustatytos pagal LST EN 12390. Betono bandinių išdžiovintų iki pastovios masės tankis, gniuždymo stipris, lenkimo stipris, ultragarso impulso sklaidimo greitis nustatyti betono bandiniams po 7 ir 28 parų kietėjimo. Taip pat po 56 parų plėtos

tyrimų išlaikant bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale. Gniuždymo ir lenkimo stipriai nustatyti hidrauliniu presu.

Betono bandinių vandens įgerčiai nustatyti imama po šešias 40×40×160 mm sijeles. Betono vandens įgerčiai nustatyti bandiniai išdžiovinami iki pastovios masės, pasveriami, pamerkiama į vandenį ir sveriami kas 24 val., kol betono bandinių masė tampa pastovi.

Tyrimams naudotų smulkiųjų ir stambiųjų užpildų užterštumo reaktyviomis uolienomis tyrimai atlikti pagal LST EN 1974:2015 standartą. Metodas pagrįstas skirtingu reaktyviųjų uolienų tirpimo intensyvumu 90 °C temperatūros 10 % natrio šarmo (NaOH) tirpale, du kartus didesniu kiekiu už jų masę. Tirpinamos reaktyviosios uolienos NaOH tirpale – opoka ir titnagas. Bandiniai užpilami tirpalu ir sudedami į termostatą, kuriame palaikoma 90±5 °C temperatūra. Atskirai apskaičiuojamos opokos ir titnago dalys procentais stambiajame ir smulkiajame užpilde pagal gautus bandinių masės pokyčius. Dviejų tos pačios frakcijos bandinių tyrimo rezultatai neturi skirtis daugiau kaip 1 %. Jei skirtumas yra didesnis, atliekamas pakartotinis trečiojo bandinio tyrimas. Galutiniams rezultatams imamas verčių aritmetinis vidurkis.

Betono bandinių šarminės korozijos tyrimai pagal plėtras buvo atliekami remiantis „RILEM AAR-2“ tyrimų metodika. „RILEM AAR-2“ metodo esmė – sukietinti 80 °C vandenyje bandiniai (40×40×160 mm) 14 parų laikomi 1 M NaOH tirpale, esant 80 °C, ir nustatoma jų plėtra. Metodikoje sakoma, kai užpilduose yra lėtai reaguojančių reaktyviųjų uolienų, laikymo trukmė turėtų būti ilgesnė. Todėl bandinių laikymo trukmė 1 M NaOH tirpale pratęsima iki 56 parų.

Pagal „RILEM AAR-2“ metodiką užpildai laikomi reaktyviais, kai betono bandinių plėtra po 14 parų išlaikymo 1 M NaOH tirpale yra didesnė kaip 0,054 %. Tęsiant tyrimą iki 56 parų, plėtros kritinė riba yra 0,1 % pagal ASTM C 441 tyrimo metodiką.

Paspartintąjį „RILEM AAR-2“ bandymą galima taikyti ir stambiesiems užpildams, tik skiedinio gamybai naudojamo užpildo dalelės turi būti nuo 125 µm iki 4 mm. Ruošiant natūralų užpildą, turi būti pašalinamos smulkiosios dalelės. Smulkusis užpildas išplaunamas. Stambusis užpildas trupinamas žiauniniu trupintuvu, sijojamas pagal reikalavimus, pateiktus 2.7 lentelėje, ir išplaunamas.

Išplauti bandiniai džiovinami 16 val. 100–110 °C temperatūroje. Gaminant mišinį buvo imama 1 dalis cemento su 2,25 dalimis užpildo. Kiekvienam mišiniui buvo gaminama po 9 sijeles (40×40×160 mm). Vandens ir cemento santykis imamas 0,47. Skiedinio pasklidimo skersmuo turi būti nuo 205 iki 220 mm.

Bandinių pailgėjimai matuojami skaitmeniniu indikatoriumi, kurio padalos vertė – 0,001 mm. Jis standžiai įtvirtinamas rėme, į kurį įstatomos prizmelės. Bandinio galuose yra įlietos įdėtinės detalės, į kurias įstatomos rėmo ir indikatoriaus ašelės.

2.7 lentelė. Sutrupintų užpildų sijojimo reikalavimai**Table 2.7.** Crushed aggregates sifting requirements

Sieto akučių dydis		Masės dalis nuo užpildų kiekio, %
Sieto akučių dydis, kuriam esant užpildo frakcija persijojama, mm	Sieto akučių dydis, kuriam esant ant sieto lieka užpildo frakcija, mm	
4	2	10
2	1	25
1	0,5	25
0,5	0,25	25
0,25	0,125	15

Skirtingų sudėčių betonų šarminės korozijos tyrimams atrinkta po keturias prizmes. Suformuotų prizmelių ilgis išmatuojamas ir prizmelės dedamos į 80 °C vandenį. Po 24 valandų vėl išmatuojamas prizmių ilgis (nulinis rodmuo). Vėliau bandiniai sudedami į nerūdijančiojo plieno konteinerius, kuriuose yra 80 °C 1 M NaOH šarmo tirpalas. Konteineriai su bandiniais įdedami į klimatinę kamerą, kurioje palaikoma 80 °C temperatūra. Bandinių ilgis matuojamas periodiškai tuo pačiu paros metu. Bandiniai, išlaikyti 24±2 valandas 80 °C temperatūroje vandenyje, išimami ir matuojamas jų ilgis, t. y. nulinis matmuo (L_0), kuris naudojamas kaip atskaitos taškas bandinių plėtrai apskaičiuoti. Bandinių, įdėtų į 80 °C 1 M NaOH šarmo tirpalą, matmenys L_n matuojami po 1, 3, 6, 9, 12, 14, 21, 28, 35, 42, 49 ir 56 bandymo parų ±2 valandos. Plėtra apskaičiuojama pagal formulę:

$$Plėtra, \% = 100 \times \left(\frac{L_n - L_0}{l} \right), \quad (2.2)$$

čia L_0 – bandinio ilgio matmuo prieš panardinant į natrio šarmo tirpalą, mm; L_n – bandinių, išlaikytų 80 °C 1 M NaOH šarmo tirpale, ilgis po 1, 3, 6, 9, 12, 14, 21, 28, 35, 42, 49 ir 56 bandymo parų ±2 valandos, mm; l – atstumas tarp bandinių įdėtinių detalių, mm.

Tyrimų analizei atlikti duomenys grupuojami ir paruošiami programa „MS Excel“. Trimatės grafinės priklausomybių interpretacijos parengtos kompiuterine programa „NCSS 12“.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Atlikus naudojamų mineralinių priedų cheminės sudėties tyrimus, nustatyta, kad didžiausias aktyviojo silicio dioksido kiekis, mažinantis šarminės korozijos poveikį betonui su užterštais reaktyviosiomis dalelėmis užpildais, yra skystojoje amorfinio silicio dioksido mikrodulkių

suspensijoje – 93,35 %. Gaminiame ceolite, lakiuosiuose pelenuose ir aukštakrosnių šlake SiO_2 kiekis yra 68,15 %, 49,80 % ir 35,10 %.

2. Patikslinta betono šarminės korozijos tyrimų metodika („RILEM AAR-2“), bandymo trukmę pratęsiant iki 56 parų. Tai leidžia įvertinti ilgalaikę betono bandinių plėtrą, naudojant reaktyviosiomis dalelėmis užterštus užpildus.

Mineraliniais priedais modifikuotų betonų struktūros, savybių ir šarminės korozijos tyrimai

Tyrimų tikslas – nustatyti aktyviųjų mineralinių priedų (silicio dioksido mikrodulkių, aukštakrosnių šlakų, lakiųjų pelenų ir gamtinio ceolito) savybes, ištirti mineralinių priedų įtaką betono fizikinėms ir mechaninėms savybėms, nustatyti skirtingų cementų tipų ir mineralinių priedų poveikį betono šarminei korozijai, efektyviausią mineralinį priedą, kuris daro didžiausią teigiamą poveikį betono šarminei korozijai.

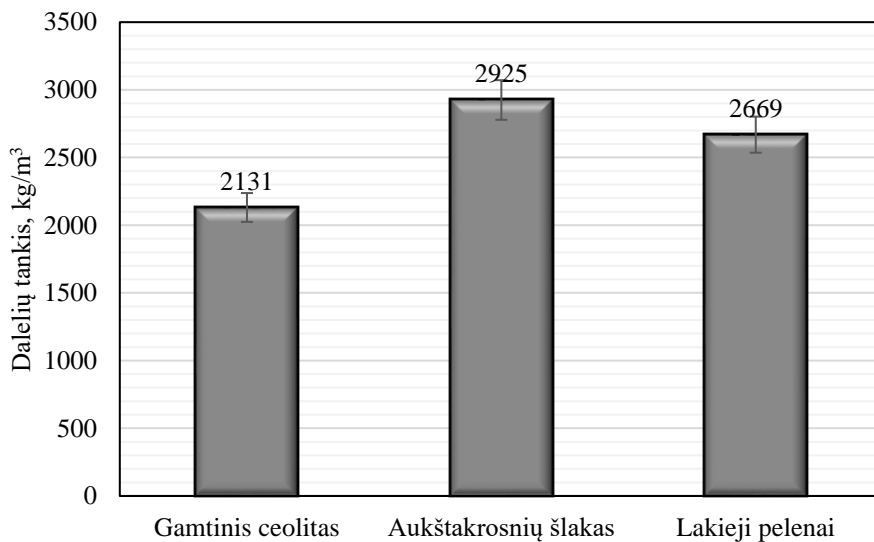
Šio skyriaus medžiaga paskelbta penkiuose straipsniuose (Rutkauskas *et al.* 2016, 2017a, 2017b; Rutkauskas ir Girskas 2015; Rutkauskas ir Nagrockienė 2015) ir pristatyta trijose mokslinėse konferencijose.

3.1. Mineralinių priedų savybės

3.1.1. Mineralinių priedų tankio ir granuliometrijos tyrimai

Atlikti mineralinių priedų (gamtinio ceolito, aukštakrosnių šlako ir lakiųjų pelenų) dalelių tankio nustatymo tyrimai, kurių rezultatai pateikti 3.1 paveiksle.

Mažiausias dalelių tankis yra gamtinio ceolito – 2131 kg/m^3 . Didžiausias dalelių tankis iš visų mineralinių priedų nustatytas aukštakrosnių šlako – 2925 kg/m^3 , ir tai yra 794 kg/m^3 daugiau, lyginant su ceolitu. Nustatytas lakiųjų pelenų dalelių tankis yra 2669 kg/m^3 (538 kg/m^3 didesnis už gamtinį ceolitą ir 256 kg/m^3 mažesnis už lakiuosius pelenus).



3.1 pav. Mineralinių priedų dalelių tankių vertės

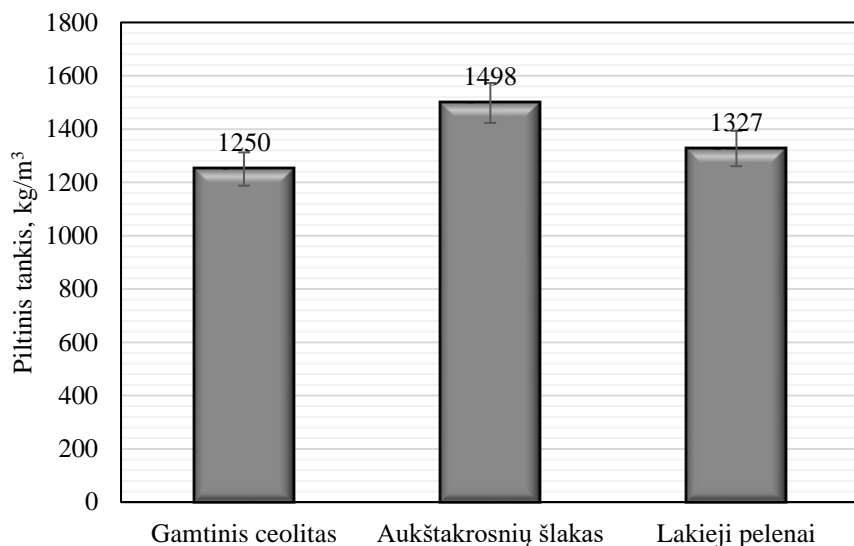
Fig. 3.1. Specific density values of mineral additives

Taip pat atlikti mineralinių priedų piltinių tankių nustatymo tyrimai, kurių rezultatai pateikti 3.2 paveiksle. Tirtų mineralinių priedų didžiausias piltinis tankis yra aukštakrosnių šlako – 1498 kg/m^3 . 171 kg/m^3 mažesnis piltinis tankis nustatytas lakiųjų pelenų – 1327 kg/m^3 . Mažiausia piltinio tankio reikšmė nustatyta gamtinio ceolito – 1250 kg/m^3 .

Lazeriniu granuliometru „CILAS 1090 Liquid“ sausuojų/šlapiuoju būdu nustatytas gamtinio ceolito ir lakiųjų pelenų dalelių pasiskirstymas pagal dydį. Kaip dispersinė terpė naudotas vanduo, o kietosios medžiagos kiekis suspensijoje buvo 8–12 %. Dalelių dydžio matavimo intervalas – $0,01\text{--}500 \mu\text{m}$. Tyrimų rezultatai pateikiami 3.3 ir 3.4 paveiksluose.

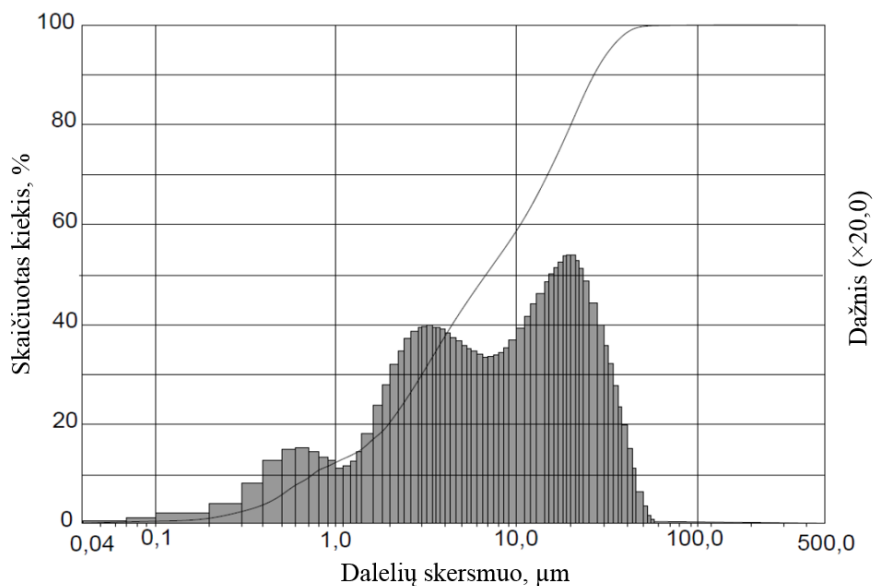
Tyrimų rezultatai rodo, kad dalelių pasiskirstymas ir vidutinis dalelių dydis skiriasi. Vidutinis lakiųjų pelenų dalelių dydis yra $12,65 \mu\text{m}$, o vidutinis gamtinio ceolito dalelių dydis – 14 % mažesnis ir yra $10,90 \mu\text{m}$.

Aukštakrosnių šlako granulometrijos tyrimų rezultatai pateikti 3.5 paveiksle.



3.2 pav. Mineralinių priedų piltinių tankių vertės

Fig. 3.2. Bulk density values of mineral additives

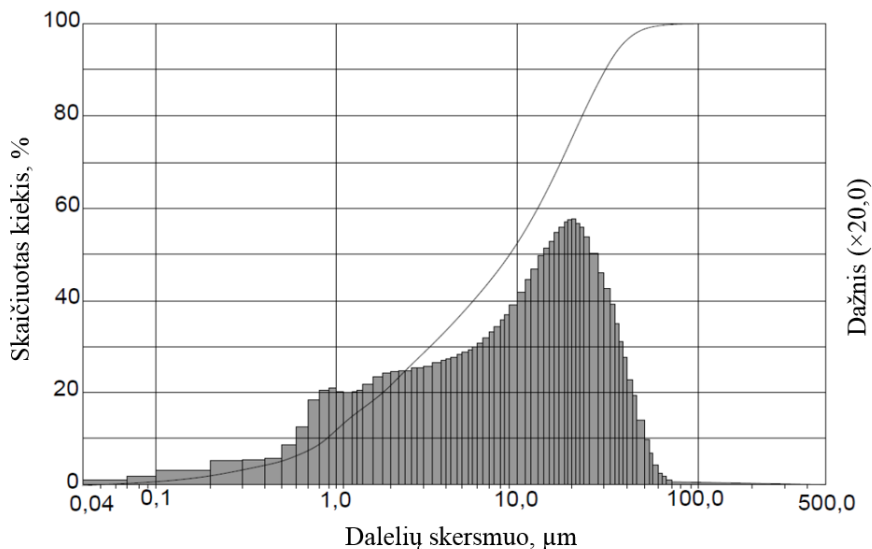


3.3 pav. Gamtinio ceolito dalelių pasiskirstymas pagal dydį

Fig. 3.3. The distribution of natural zeolite particles by size

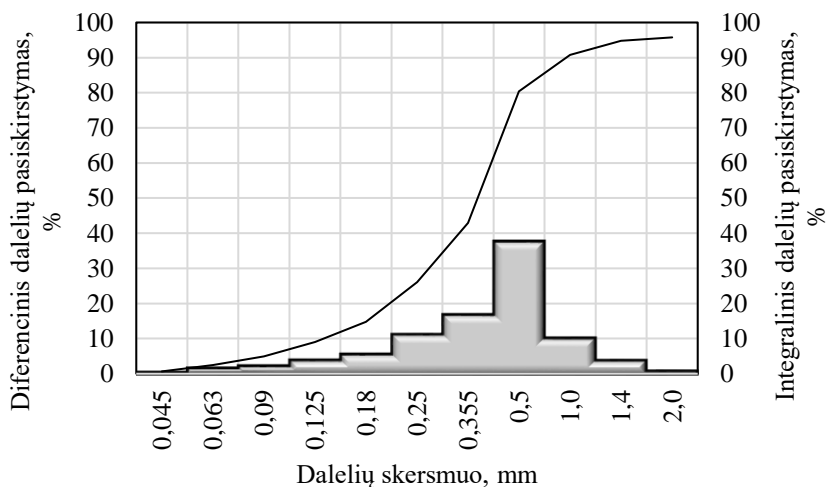
Aukštakrosnių šlako granulimetrinė sudėtis nustatyta sijoimo metodu. Šis metodas taikytas, nes tiriamojo mineralinio priedo dalelės yra didesnės negu

63 μm . Sietų rinkinį sudarė 11 sietų, kurių akučių didumas yra nuo 0,045 mm iki 2 mm.



3.4 pav. Lakiųjų pelenų dalelių pasiskirstymas pagal dydį

Fig. 3.4. The distribution of fly ash particles by size



3.5 pav. Aukštakrosnių šlako granulimetrinė sudėtis

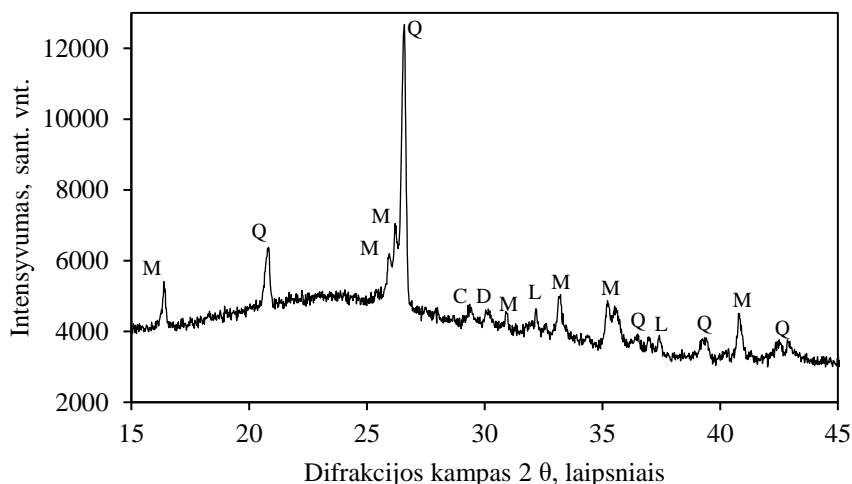
Fig. 3.5. Granulometric composition of blast furnace slag

Atlikus oro pralaidumo bandymą pagal Bleino metodiką nustatyti gamtinio ceolito ir lakiųjų pelenų specifiniai savitieji paviršiai. Nustačius vidutines oro klampumo reikšmes, apskaičiuojamas medžiagų savitasis paviršius. Gamtinio ceolito specifinio savitojo paviršiaus reikšmė yra $656 \text{ m}^2/\text{kg}$, o lakiųjų pelenų – $410 \text{ m}^2/\text{kg}$.

3.1.2. Mineralinių priedų struktūros tyrimai

Atliekant rentgeno spinduliuotės difrakcinę analizę nustatyta mineralinių priedų mineralinė struktūra.

Lakiųjų pelenų rentgenostruktūrinės analizės tyrimų rezultatai pateikiami 3.6 paveiksle. Kaip matoma iš rentgenogramos, dominuojantis mineralas yra kvarcas (SiO_2) Q, kurio yra 55 %. Antrasis mineralas pagal kiekį (29 %) lakiuosiuose pelenuose yra mulitas ($\text{Al}_{2,34} \text{Si}_{0,66}$) M. Taip pat sudėtyje yra kalcio karbonatų (Ca CO_3) C, kalcio oksidų (CaO) L ir diopsido ($\text{Ca Mg Si}_2 \text{O}_6$) D, kurių lakiuosiuose pelenuose yra 3,7 %, 4,9 % ir 7,4 %.



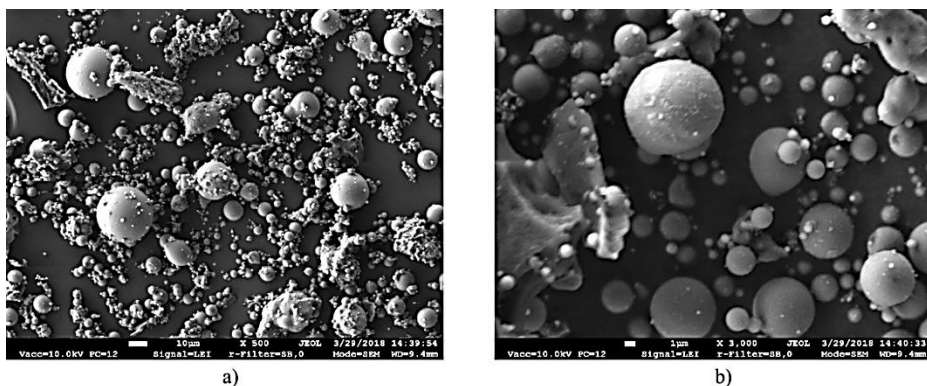
3.6 pav. Lakiųjų pelenų rentgenograma: Q – kvarcas (SiO_2); M – mulitas ($\text{Al}_{2,34} \text{Si}_{0,66}$); C – kalcio karbonatas (Ca CO_3); L – kalcio oksidas (CaO); D – diopsidas ($\text{Ca Mg Si}_2 \text{O}_6$)

Fig. 3.6. The X-ray diffraction pattern of fly ash: Q – quartz (SiO_2); M – mullite ($\text{Al}_{2,34} \text{Si}_{0,66}$); C – Calcium carbonate (Ca CO_3); L – calcium oxide (CaO); D – diopside ($\text{Ca Mg Si}_2 \text{O}_6$)

Lakiuosius pelenus ištyrus skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu, gautos mineralinių priedų mikrostruktūros nuotraukos, pateiktos 3.7 paveiksle. Mineralinio priedo vaizdas, padidintas 500 kartų, pateiktas 3.7 a) paveiksle. Matoma daugiausia taisyklingos sferinės formos dalelių. Vidutiniškai dalelių dydis yra apie

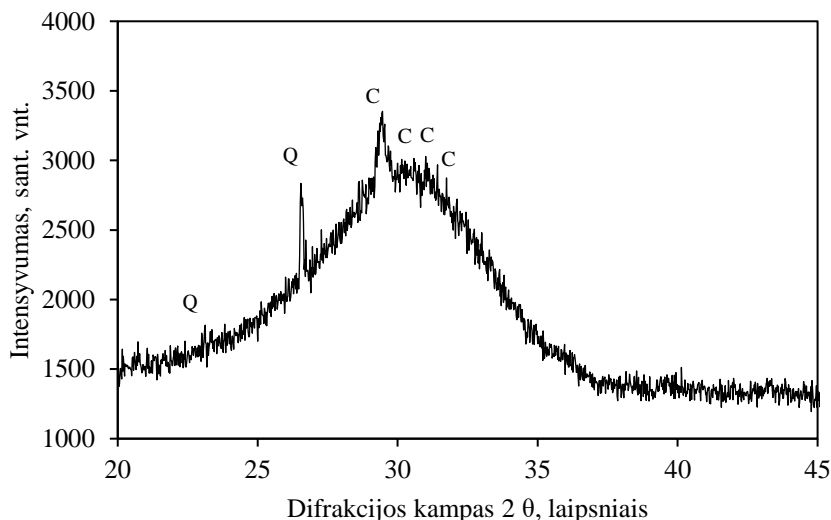
13 μm . Vaizdą padidinus iki 3000 kartų (3.7 pav., b) matoma, kad smulkiausiųjų dalelių forma yra sferinės formos.

Aukštakrosnių šlako rentgeno difrakcinės analizės tyrimų rezultatai pateikti 3.8 paveiksle.



3.7 pav. Lakiųjų pelenų priedo mikrostruktūra: a) padidinta 500 kartų;
b) padidinta 3000 kartų

Fig. 3.7. Microstructure of fly ash: a) magnification $\times 500$, b) magnification $\times 3000$

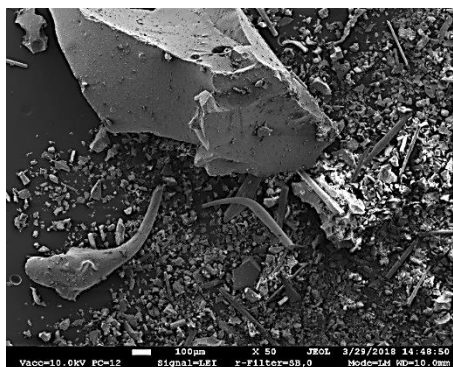


3.8 pav. Aukštakrosnių šlako rentgenograma: Q – kvarcas (SiO_2);
C – kalcio karbonatas $\text{Ca}(\text{CO}_3)$

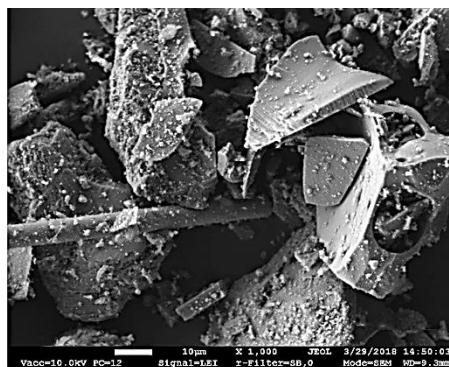
Fig. 3.8. The X-ray diffraction pattern of blast furnace slag: Q – quartz (SiO_2);
C – calcium carbonate $\text{Ca}(\text{CO}_3)$

Kaip matoma iš rentgenogramos (3.8 pav.), smailių intensyvumas nėra didelis, o cheminė analizė rodo, kad aukštakrosnių šlake yra 35,1 % SiO_2 (2.1 lentelė). Rentgenograma rodo, kad 22 % aukštakrosnių šlako sudaro kvarcas (SiO_2) Q. Iš karbonatų aukštakrosnių šlake vyrauja kalcio karbonatas $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ C, kurio yra 78 %.

Atlikus aukštakrosnių šlakų tyrimus skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu, gautos nuotraukos, kurios pateikiamos 3.9 paveiksle. Kaip matoma iš vaizdo, padidinto 50 kartų (3.9 pav., a), aukštakrosnių šlako dalelių dydis ir forma yra labai įvairi: nuo stambių ir netaisyklingų apie 2 mm siekiančių dalelių iki taisyklingus pilnavidurius vamzdelius primenančių formų ir labai smulkių dalelių. Vaizdą padidinus iki 1000 kartų (3.9 pav., b) matoma, kad didžioji dalis dalelių yra netaisyklingos formos.



a)



b)

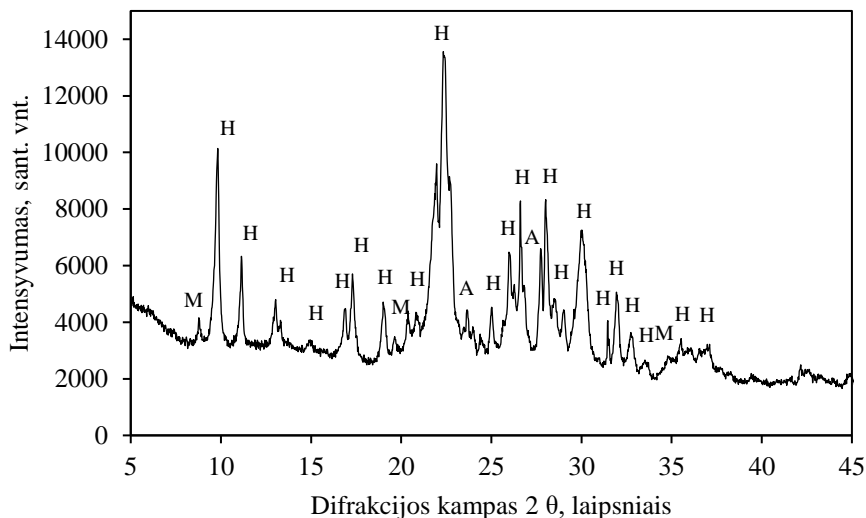
3.9 pav. Aukštakrosnių šlako priedo mikrostruktūra: a) padidinta 50 kartų;
b) padidinta 1000 kartų

Fig. 3.9. Microstructure of blast furnace slag: a) magnification $\times 50$,
b) magnification $\times 1000$

Rentgeno difrakcinės analizės metodu nustatyta gamtinio ceolito mineralinė struktūra, kuri pateikta 3.10 paveiksle. Nustatyta, kad dominuojantis elementas yra heulanditas ($\text{Na}_{2,6} \text{Mg}_{0,36} \text{Al}_{3,32} \text{Si}_{14,68} \text{O}_{36} (\text{H}_2\text{O})_{10,32}$) H, kurio bendras kiekis gamtiniame ceolite sudaro 92,2 %. Taip pat rentgenograma rodo muskovitą ($(\text{K}, \text{Na}) (\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2 (\text{Si}_{3,1} \text{Al}_{0,9}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2$) M ir anortitą ($\text{Ca Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_8$) A, kurių kiekis gamtiniame ceolite yra 0,7 ir 7,1 %.

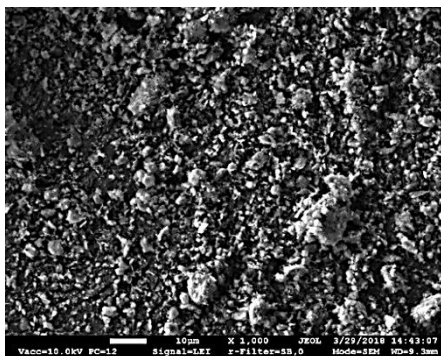
3.11 paveiksle pateiktos gamtinio ceolito mikrostruktūros nuotraukos. Kaip matoma iš 3.11 a) paveikslo, malto gamtinio ceolito priedo dalelės yra netaisyklingos formos, o jų dydis vidutiniškai yra apie 11 μm . Padidinus vaizdą 5000 kartų (3.11 pav., b), matoma, kad gamtinio ceolito dalelės sudarytos iš daugybės

įvairiomis kryptimis išsidėsčiusių netaisyklingų ir kampuotų kristalų, o jų dydis yra iki $0,5\ \mu\text{m}$.

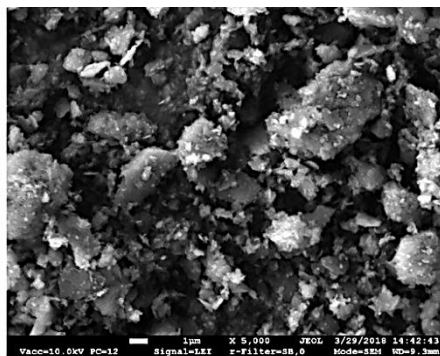


3.10 pav. Gamtinio ceolito rentgenograma: H – heulanditas ($\text{Na}_{2,6}\text{Mg}_{0,36}\text{Al}_{3,32}\text{Si}_{14,68}\text{O}_{36}(\text{H}_2\text{O})_{10,32}$); M – muskovitas ($(\text{K}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}_{3,1}\text{Al}_{0,9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$); A – anortitas ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)

Fig. 3.10. The X-ray diffraction pattern of natural zeolite: H – heulandite ($\text{Na}_{2,6}\text{Mg}_{0,36}\text{Al}_{3,32}\text{Si}_{14,68}\text{O}_{36}(\text{H}_2\text{O})_{10,32}$); M – muscovite ($(\text{K}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}_{3,1}\text{Al}_{0,9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$); A – anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)



a)



b)

3.11 pav. Gamtinio ceolito priedo mikrostruktūra: a) padidinta 1000 kartų;
b) padidinta 5000 kartų

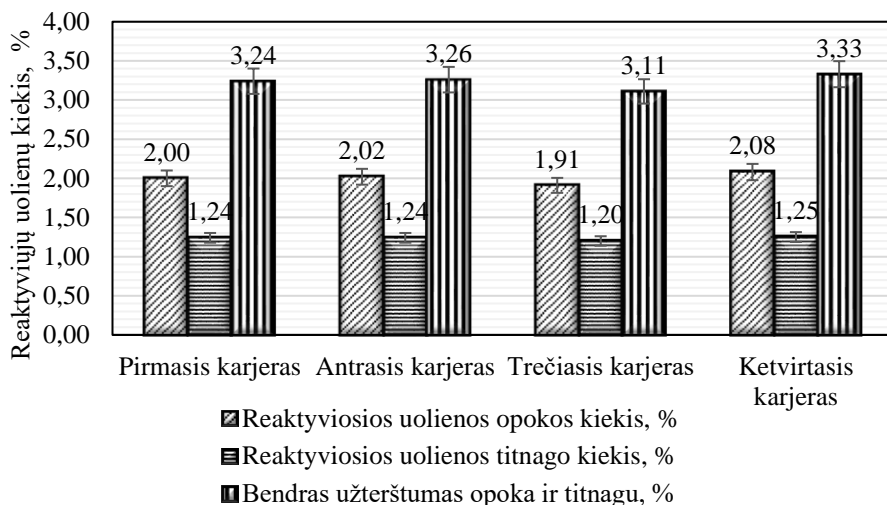
Fig. 3.11. Microstructure of natural zeolite: a) magnification $\times 1000$,
b) magnification $\times 5000$

3.2. Užpildų reaktyvumo tyrimai

3.2.1. Žvirgždo užterštumo reaktyviosiomis dalelėmis tyrimai

Telkinių, esančių skirtinguose regionuose, žvirgždo užterštumo reaktyviosiomis uolienomis tyrimų rezultatai pateikti 3.12 paveiksle.

Nustatyta, kad visi tirti žvyro telkinių stambieji užpildai yra užteršti reaktyviosiomis uolienomis (opoka ir titnagu), kurios reaguoja su betono porų tirpale esančiais šarmais ir sukelia plėtrą bei suketėjusio betono pažaidas.



3.12 pav. Žvirgždo ir žvirgždo skaldos užterštumo reaktyviosiomis dalelėmis bandymų rezultatai

Fig. 3.12. Contamination test results of gravel and crushed gravel with reactive particles

Lyginant tirtų karjerų žvirgždo užterštumą, nustatyta, kad mažiausiai žalingų priemonių turi trečiojo karjero žvirgždas (3,11 %), antrasis ir pirmasis karjerai užteršti 3,26 % ir 3,24 % opoka ir titnagu. Didžiausias užterštumas nustatytas su ketvirtojo karjero žvirgždo skalda – 3,33 %.

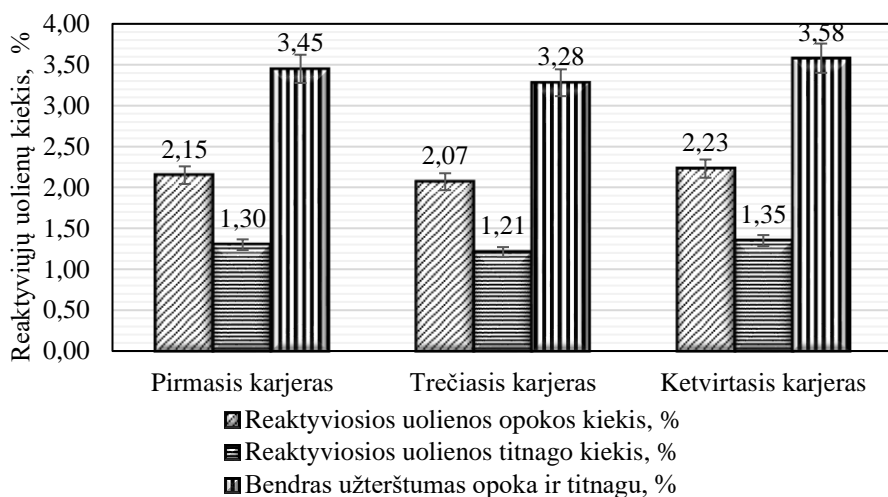
Atlikus tyrimus nustatyta, kad visų tirtų karjerų užpildų užterštumas opoka ir titnagu labai panašus, todėl galima teigti, kad visų tirtų karjerų žvirgždas yra vienodai užterštas reaktyviosiomis uolienomis.

3.2.2. Smėlio užterštumo reaktyviosiomis dalelėmis tyrimai

Iš rezultatų (3.13 pav.) nustatyta, kad tirtų karjerų smėliai yra labiau užteršti reaktyviosiomis dalelėmis negu žvirgždas. Tyrimais nustatyta, kad smėlis, kaip ir žvirgždas, mažiausiai užterštas trečiajame karjere (3,28 %). Pirmojo karjero

smėlio užterštumas yra 3,45 %. Nustatyta, kad ketvirtojo karjero smėlis – daugiausia užterštas reaktyviosiomis dalelėmis, sukeliančiomis betono šarminę koroziją. Ketvirtojo karjero smėlio užterštumas yra 3,58 %.

Smėlių iš skirtingų karjerų užterštumas reaktyviosiomis dalelėmis skiriasi nedaug. Nustatyta, kad smėlis, kaip ir žvirgždas, yra vienodai užterštas reaktyviosiomis uolienomis.



3.13 pav. Smėlio užterštumo reaktyviosiomis dalelėmis bandymų rezultatai

Fig. 3.13. Contamination test results of sand with reactive particles

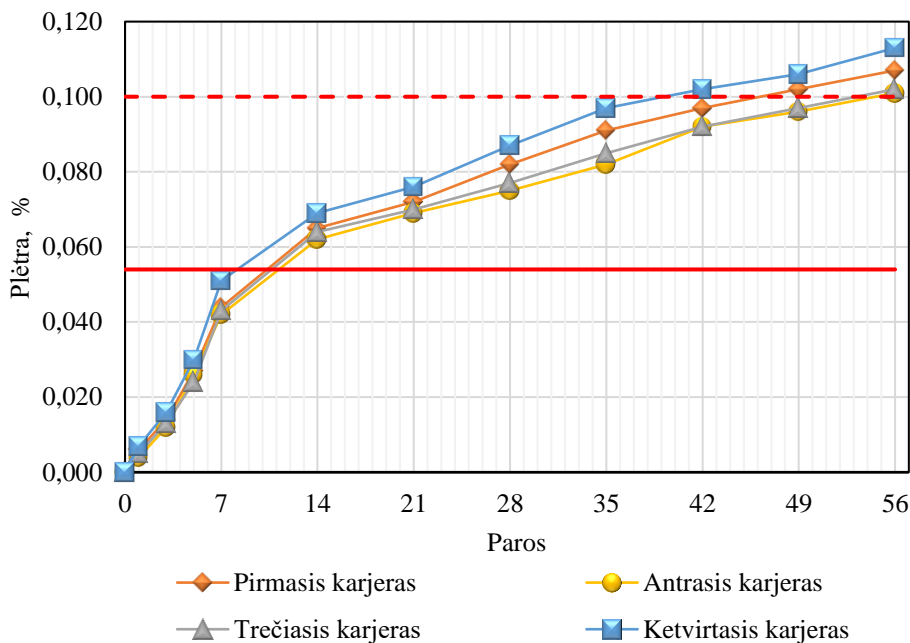
Nustatyta, kad smėlis daro didesnę įtaką betono šarminėi korozijai negu žvirgždas ir žvirgždo skalda. Tai yra dėl dalelių dydžio – mažesnės dalelės reaguoja kur kas greičiau, ir padaroma žala išryškėja taip pat anksčiau, negu stambiojo užpildo šarminės korozijos atveju.

3.2.3. Betono su smėliu šarminės korozijos tyrimai

Su visais smėliais buvo formuojamos sijelės ir atlikti šarminės korozijos tyrimai pagal „RILEM AAR-2“ metodiką. Betono bandinių su CEM I 42,5 R tipo cementu nustatyta plėtra išlaikant bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale iki 56 bandymo parų pateikta 3.14 paveiksle.

Po 56 bandymo parų išlaikymo 80 °C 1 M NaOH tirpale visų bandinių plėtra viršijo 0,1 %. Didžiausia plėtra nustatyta su smėliu iš ketvirtojo karjero – 0,113 %, o mažiausia su smėliu iš antrojo karjero – 0,101 %. Šiek tiek didesnė plėtra nustatyta su smėliu iš trečiojo karjero – 0,102 %. Betono bandinių su smėliu iš pirmojo karjero plėtra yra 0,107 %. Iš grafiko matoma, kad gauti rezultatai yra tiesiogiai proporcingi rezultatams, gautiems atlikus užpildų užterštumo

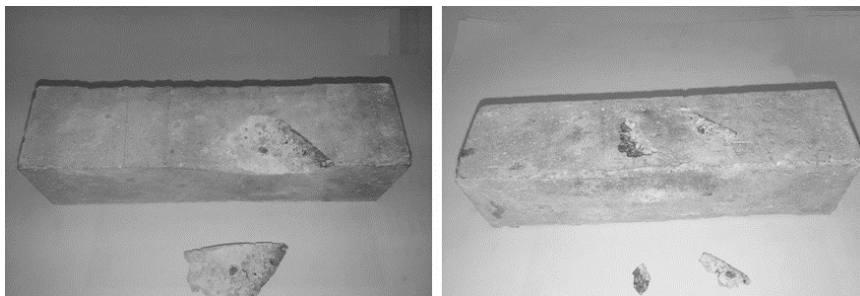
reaktyviosiomis dalelėmis tyrimus. Didžiausios plėtros nustatytos su smėliais, kurie yra daugiausia užteršti reaktyviosiomis opokos ir titnago uolienomis.



3.14 pav. Betono bandinių su skirtingais smėliais ir cementu CEM I 42,5 R plėtrų vertės po 56 parų, išlaikius bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale
Fig. 3.14. Expansion values of specimens made of concrete mixes with different sands and cement CEM I 42.5 R after 56 days of conditioning in 1N NaOH solution of 80°C

Išanalizavus užpildų užterštumo reaktyviosiomis dalelėmis ir šarminės korozijos tyrimų rezultatus, tolimesniems tyrimams pasirinktas reaktyviausias užpildas, t. y. ketvirtojo karjero smėlis, kurio bendras užterštumas reaktyviosiomis dalelėmis yra 3,58 % (1,35 % reaktyviojo titnago ir 2,23 % reaktyviosios opokos), o betono bandinių plėtra – 0,113 %.

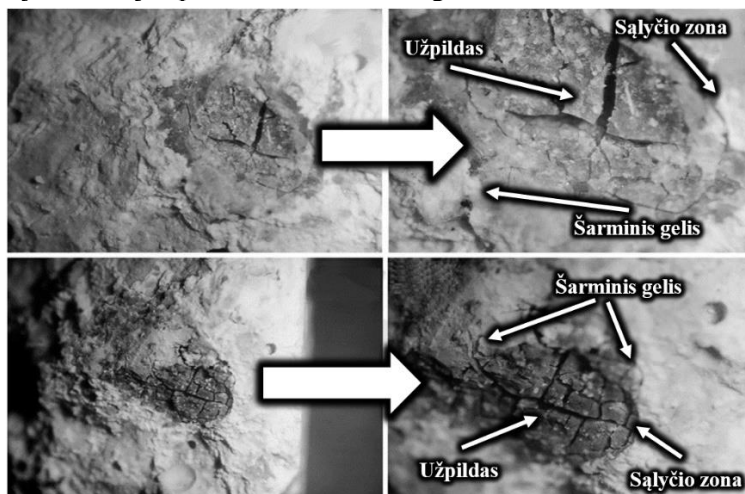
Išlaikant bandinius dar ilgiau – iki 150 parų 1 M NaOH tirpale, matomi stiprūs paviršiaus pažeidimai, kurie pateikti 3.15 paveiksle. Matoma, kad atsiranda gilių bandinio paviršiaus įtrūkių. Vykstant šarminės korozijos reakcijai silicio dioksidas, esantis betono užpilduose, reaguoja su dideliu šarmų kiekiu, taip betono mikroporose susidaro šarminis gelis, kuris, esant drėgnai aplinkai, plečiasi ir lėtai, bet stipriai ardo betonines konstrukcijas. Betono užpildų ir cemento sąlyčio zonoje besiformuojantis šarminis gelis sukelia bandinių plėtrą ir susidaro vidiniai įtempiai, tai – pagrindinė paviršiaus pleišėjimo ir ištūpėjimo priežastis.



3.15 pav. Betono bandinių, išlaikytų 150 parų 80 °C temperatūros
1 M NaOH tirpale, pažaidos

Fig. 3.15. Damages in concrete specimens after 150 days of conditioning
in 1N NaOH solution of 80°C

Pažeistos bandinių vietos ištirtos optiniu mikroskopu. Betono šarminės korozijos sukelta užpildų destrukcija pateikta 3.16 paveiksle. Pažaidų vietose matomos pažeistos reaktyviosios užpildų dalelės sureagavusios su šarmais. Nustatytos cementinio akmens ir sutrūkinėjusio užpildo sąlyčio zonos, kuriose susidaręs šarminis korozijos reakcijos produktas – šarminis gelis.



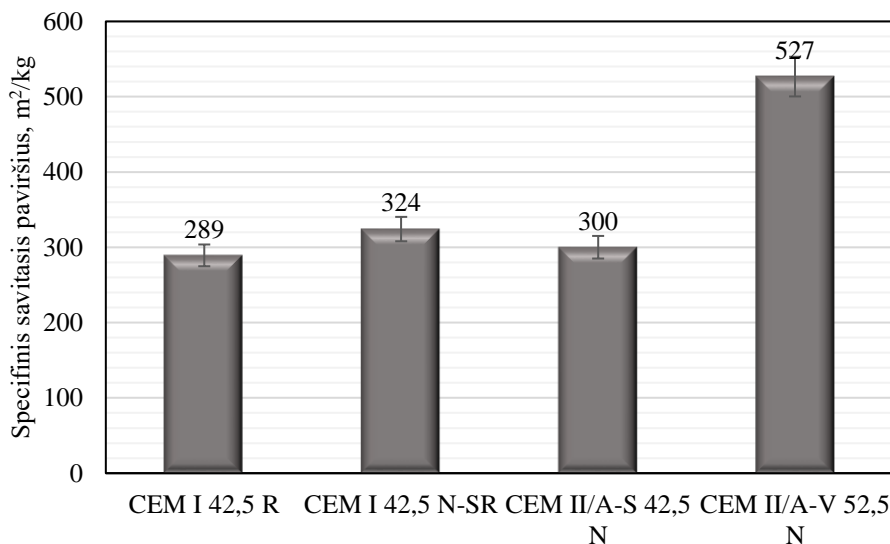
3.16 pav. Betono šarminės korozijos sukelta užpildų destrukcija

Fig. 3.16. Alkali-silica reaction caused destruction of concrete aggregates

3.3. Sudėtinių cementų savybės ir jų poveikis betono šarminei korozijai

Cementų specifinis savitasis paviršius nustatytas pagal Bleino metodiką, tyrimų rezultatai pateikti 3.17 paveiksle. Didžiausias specifinis savitasis paviršius, kuris

yra didesnis už kitų cementų, nustatytas cemento CEM II/A-V 52,5 N, kuris yra $527 \text{ m}^2/\text{kg}$, o mažiausias specifinis savitasis paviršius cemento be mineralinių priedų – CEM I 42,5 R. Cementų CEM I 42,5 N-SR ir CEM II/A-S 42,5 N specifinio savitojo paviršiaus vertės yra $324 \text{ m}^2/\text{kg}$ ir $300 \text{ m}^2/\text{kg}$.



3.17 pav. Cementų specifinio savitojo paviršiaus vertės

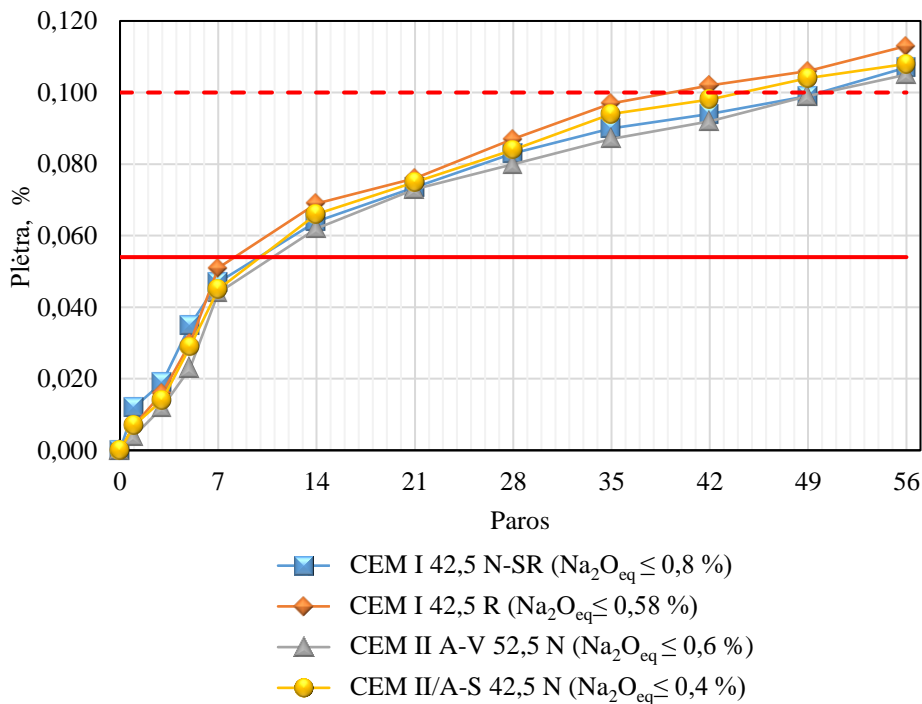
Fig. 3.17. Specific surface area values of cements

Naudojant cementus CEM I 42,5 N-SR, CEM I 42,5 R, CEM II A-V 52,5N, CEM II/A-S 42,5 N, atlikti šarminės korozijos tyrimai pagal „RILEM AAR-2“ tyrimų metodiką, naudojant reaktyviausią užpildą – ketvirtojo karjero smėlį. Gauti rezultatai pateikti 3.18 paveiksle.

Betono su ketvirtojo karjero smėliu ir cementu be aktyviųjų mineralinių priedų CEM I 42,5 R plėtra, išlaikius 56 paras 80°C temperatūros 1 M NaOH tirpale, yra 0,113 %. Mažesnė plėtra nustatyta su šlakiniu cementu CEM II/A-S 42,5 N, kuri yra 0,108 %. Panaudojus mažąšarmį cementą CEM I 42,5 N-SR plėtra po 56 parų yra 0,107 %. Mažiausios plėtros reikšmės nustatytos panaudojus cementą CEM II A-V 52,5N, turintį pelenų priedo. Bandinių, išlaikytų 56 paras 80°C temperatūros 1 M NaOH tirpale, plėtra yra 0,105 %.

Atlikus tyrimus nustatyta, kad, naudojant cementą be aktyviųjų mineralinių priedų, betone vykstanti šarminės korozijos reakcija sukelia didžiausias plėtras. Dėl to galima teigti, kad, naudojant cementą CEM I 42,5 R, šarminės korozijos reakcija neribojama, dėl to bandiniuose vykstanti plėtra gali pažeisti bandinius. Bandymams atlikti panaudojus mažąšarmį cementą ir cementus su pelenų bei šlakų mineraliniais priedais, plėtra šiek tiek mažėja, tačiau pokytis yra minimalus ir neleidžia išvengti pavojaus plėtros.

Tęsiant tolimesnius tyrimus pasirinktas cementas be aktyviųjų mineralinių priedų CEM I 42,5 R, kad, naudojant aktyviuosius mineralinius priedus, būtų galima nustatyti jų poveikį betono šarminei korozijai.



3.18 pav. Betono bandinių su skirtingais cementais ir ketvirtojo karjero smėliu, išlaikytų 56 paras 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, plėtrų vertės

Fig. 3.18. Expansion values of specimens made of different cements and sand from Quarry No 4 after 56 days of conditioning in 1N NaOH solution of 80°C

3.4. Mineraliniais priedais modifikuotų betonų savybių tyrimai

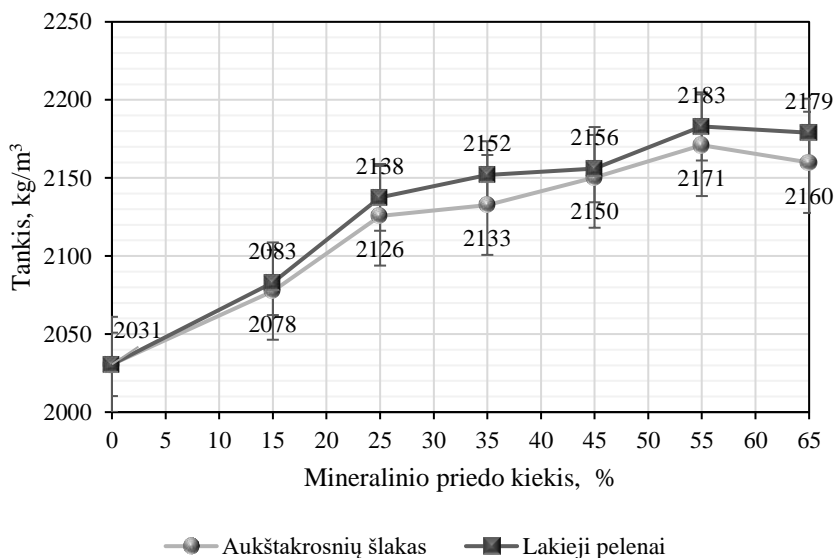
3.4.1. Betonų modifikuotų aukštakrosnių šlaku ir lakiaisiais pelenais savybių tyrimai

Modifikavus betoną aukštakrosnių šlaku bei lakiaisiais pelenais ir ištyrus jų poveikį betono tankiui, gauti rezultatai pateikti 3.19 paveiksle.

Nustatyta, kad tankio reikšmės didėja didinant aukštakrosnių šlako kiekį betone. Cementą keičiant šlaku nuo 15 % iki 55 % žingsniu kas 10 % bandinių tankio reikšmės, lyginant su kontroliniu bandiniu, didėja 47 (2,31 %) kg/m^3 , 95

(4,68 %) kg/m^3 , 102 (5,02 %) kg/m^3 , 119 (5,86 %) kg/m^3 ir 140 (6,89 %) kg/m^3 . Didžiausia tankio reikšmė – 2171 kg/m^3 panaudojus 55 % mineralinio priedo. Aukštakrosnių šlako kiekį padidinus iki 65 %, tankio reikšmė mažėja ir yra 2160 kg/m^3 .

Cementą pakeitus lakiųjų pelenų mineraliniu priedu ir atlikus tyrimus, nustatyta, kad tankio reikšmės didėja iki 55 %, pakeičiant rišamąją medžiagą mineraliniu priedu, ir yra 2183 kg/m^3 , o tai yra 61 kg/m^3 (2,79 %) skirtumas, lyginant su kontrolinių bandinių tankio reikšme. Betoną modifikavus 65 % lakiisiais pelenais, tankio reikšmė mažėja ir yra 2179 kg/m^3 . Tai yra 4 kg/m^3 mažiau, nei betoną modifikuojant 55 % mineraliniu priedu.

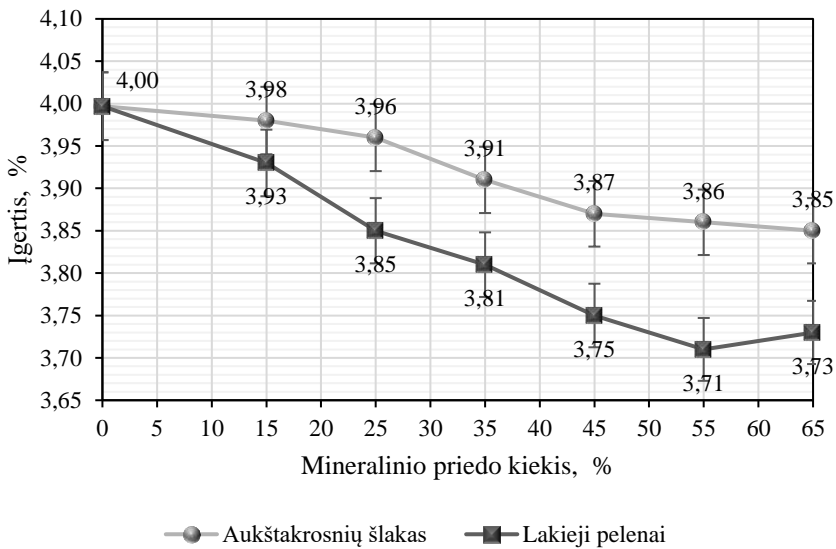


3.19 pav. Betono tankio priklausomybė nuo lakiųjų pelenų ir aukštakrosnių šlako priedų kiekio

Fig. 3.19. Relationship between the density of concrete, fly ash and blast furnace slag

Betono sudėtį modifikavus mineraliniais priedais, vandens įgerties reikšmės betono bandiniuose mažėja. Tyrimų rezultatai pateikti 3.20 paveiksle. Panaudojus 15 % ir 25 % aukštakrosnių šlako, vandens įgerties reikšmės mažėja, lyginant su kontroliniu bandiniu, kurio vandens įgerties reikšmė lygi 4 %, t.y. mažėja iki 3,98 % ir 3,96 %. Mineralinio priedo kiekį padidinus iki 35 % vandens įgerties reikšmės pokytis sudaro 3,91 %. Aukštakrosnių šlako kiekį padidinus iki 45 %, vandens įgerties reikšmė mažėja 0,04 % ir yra 3,87 %. Cementą pakeitus 55 % ir maksimaliu kiekiu 65 % aukštakrosnių šlaku, įgerties reikšmė mažėja minimaliai, lyginant su 45 % šlako kiekiu, bei yra 3,86 % ir 3,85 %.

Nustatyta, kad modifikavus betono sudėtį 15 % lakiųjų pelenų priedu, vandens įgerties reikšmė mažėja iki 3,93 %, o pelenų kiekį žingsniu kas 10 % tolygiai didinant iki 55 %, vandens įgerties reikšmės mažėja – 3,85 %, 3,81 %, 3,75 % ir 3,71 %. Mineralinio priedo kiekį padidinus iki maksimalaus 65 % kiekio, vandens įgerties reikšmė padidėja (3,73 %), o tai reiškia, kad perdozuota lakiųjų pelenų priedo.

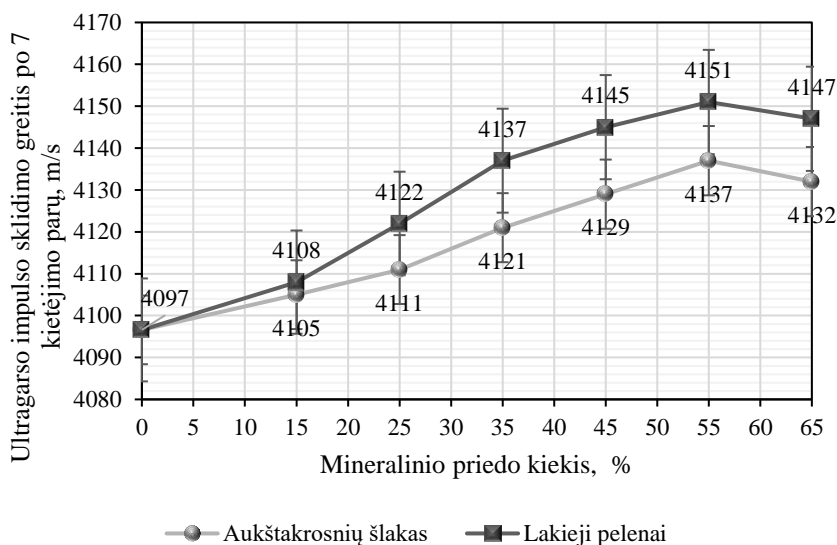


3.20 pav. Betono vandens įgerties priklausomybė nuo lakiųjų pelenų ir aukštakrosnių šlako priedų kiekio

Fig. 3.20. Relationship between the water absorption of concrete, fly ash and blast furnace slag

Betono bandinių, modifikuotų aukštakrosnių šlako ir lakiųjų pelenų mineraliniais priedais, ultragarso impulso sklaidimo greičio po 7 parų kietėjimo tyrimų rezultatai pateikiami 3.21 paveiksle. Atlikus tyrimus nustatyta, kad, didinant mineralinio priedo kiekį iki 55 %, betono bandinių UIG reikšmės didėja. Padidinus šlako kiekį iki 65 %, UIG reikšmė mažėja ir yra 4132 m/s.

Betono mišinį modifikavus 15 % ir 25 % pelenų priedu, ultragarso impulso sklaidimo greičio reikšmės padidėja 0,27 % ir 0,61 % bei yra 4108 m/s ir 4122 m/s. Rišamąją medžiagą pakeitus 35 % lakiųjų pelenų priedu, UIG reikšmė didėja iki 4137 m/s, o tai yra 0,98 % daugiau už kontrolinių bandinių. Padidinus mineralinio priedo kiekį iki 45 %, UIG reikšmė padidėja 1,17 % ir yra 4145 m/s. Nustatyta, kad didžiausias ultragarso impulso sklaidimo greitis 4151 m/s nustatytas su 55 % lakiųjų pelenų priedu. Padidinus priedo kiekį iki 65 %, UIG reikšmė mažėja ir yra 4147 m/s.



3.21 pav. Betono, kietėjusio 7 paras, ultragarso impulso sklaidimo greičio priklausomybė nuo lakiųjų pelenų ir aukštakrosnių šlako priedų kiekio

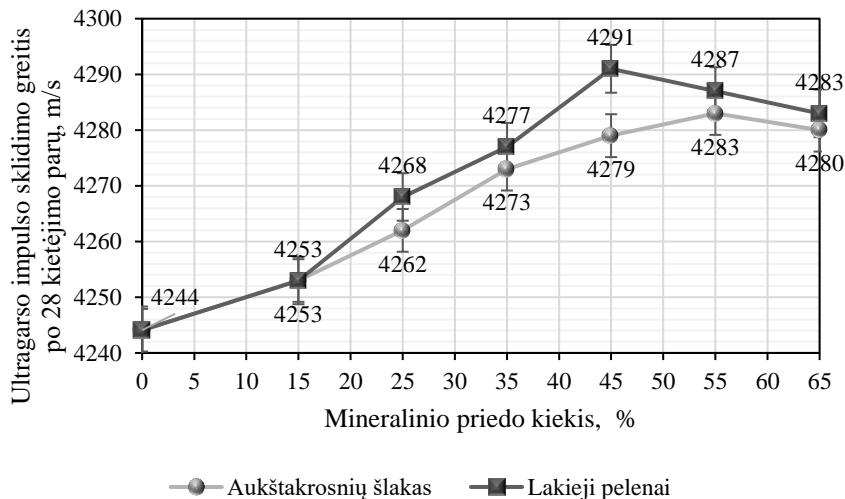
Fig. 3.21. Relationship between the ultrasonic pulse propagation velocity of concrete, fly ash and blast furnace slag after 7 hardening days

Su bandiniais kietėjusiais 28 paras, modifikuotais šlaku ir pelenais, atlikti UIG tyrimai. Tyrimų rezultatai pateikiami 3.22 paveiksle. Kontrolinių bandinių be mineralinių priedų UIG lygus 4244 m/s. Panaudojus 55 % mineralinio priedo, nustatytas didžiausias ultragarso impulso sklaidimo greitis – 4283 m/s. Tai yra 0,92 % daugiau už kontrolinio bandinio UIG. Padidinus aukštakrosnių šlako kiekį iki maksimalaus 65 % tiriamojo mineralinio priedo kiekio, UIG reikšmė mažėja ir yra 4280 m/s.

Modifikavus betono mišinį 15 % ir 25 % lakiisiais pelenais, ultragarso impulso sklaidimo greičio reikšmės didėja 0,21 % ir 0,57 % bei yra 4253 m/s ir 4268 m/s. Padidinus pelenų kiekį iki 35 %, UIG yra 4277 m/s ir tai yra 0,78 % daugiau nei kontrolinio bandinio. Didžiausias ultragarso impulso sklaidimo greitis (4291 m/s) nustatytas betono mišinį modifikavus 45 % lakiųjų pelenų priedu. Toliau didinant mineralinio priedo kiekį, UIG reikšmės mažėja. Padidinus lakiųjų pelenų kiekį iki 55 % ir 65 %, ultragarso impulso sklaidimo greičio reikšmės mažėja iki 4287 m/s ir 4283 m/s.

Betono, kietėjusio 7 paras, gniuždymo stiprio rezultatai, betoną modifikavus šlako ir pelenų priedais, pateikti 3.23 paveiksle. Priedo kiekį padidinus iki 45 %, nustatytas didžiausias gniuždymo stipris – 53,87 MPa, ir tai yra 7,09 MPa daugiau už kontrolinį bandinį, t. y. bendras pokytis sudaro 15,16 %, lyginant su kontroliniu bandiniu be mineralinio priedo. Cementą pakeitus 55 % ir 65 % aukštakrosnių

šlaku, gniuždymo stiprio reikšmės mažėja bei yra lygios 42,87 MPa ir 38,32 MPa. Atlikus tyrimus nustatyta, kad ribinis šlako kiekis betone yra 45 % nuo cemento kiekio.

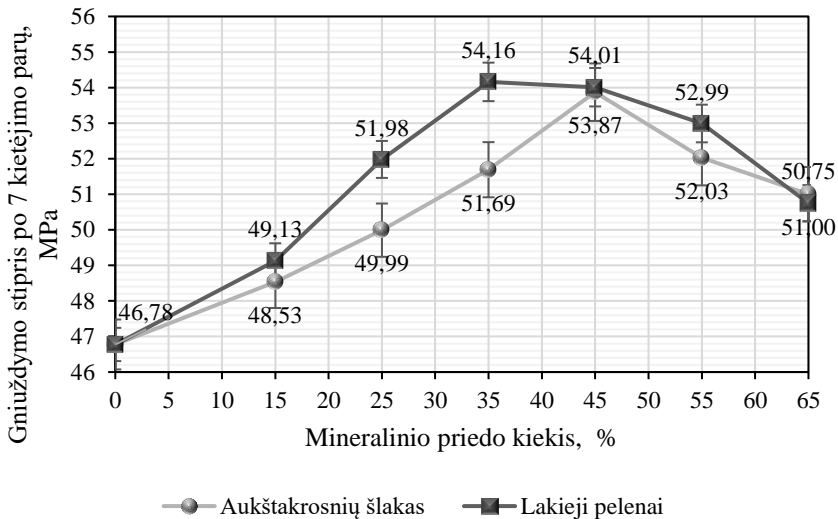


3.22 pav. Betono, kietėjusio 28 paras, ultragarso impulso sklaidimo greičio priklausomybė nuo lakiųjų pelenų ir aukštakrosnių šlako priedų kiekio

Fig. 3.22. Relationship between the ultrasonic pulse propagation velocity of concrete, fly ash and blast furnace slag after 28 hardening days

Betone 15 % cemento pakeitus lakiaisiais pelenais, gniuždymo stiprio reikšmė didėja (2,35 MPa), lyginant su kontrolinių bandinių stipriu, ir yra 49,13 MPa. Įdėjus 25 % mineralinio priedo, gniuždymo stiprio reikšmė, bandiniui kietėjus 7 paras, didėja iki 51,98 MPa. Padidinus mineralinio priedo kiekį iki 35 % nuo rišamosios medžiagos kiekio, gniuždymo stiprio reikšmė didėja iki didžiausios reikšmės, kuri yra lygi 54,16 MPa, ir tai yra 15,78 % daugiau nei kontrolinių bandinių. Lakiųjų pelenų kiekį padidinus iki 45 %, gniuždymo stiprio reikšmė mažėja nedaug ir yra 54,01 MPa. Cementą pakeitus 55 % ir 65 % mineraliniu priedu, gniuždymo stiprio reikšmės mažėja ir yra lygios 52,99 MPa ir 50,75 MPa.

Betono, kietėjusio 28 paras, gniuždymo stiprio tyrimo rezultatai pateikiami 3.24 paveiksle. Kontrolinių bandinių be mineralinių priedų gniuždymo stipris po 28 kietėjimo parų yra lygus 52,08 MPa. Didžiausia betono, kietėjusio 28 paras, gniuždymo stiprio reikšmė nustatyta su 45 % aukštakrosnių šlako mineraliniu priedu ir yra 57,13 MPa, t. y. 5,05 MPa (9,7 %) daugiau už kontrolinio bandinio gniuždymo stiprio reikšmę. Didinant mineralinio priedo kiekį iki 55 % ir 65 %, gniuždymo stiprio reikšmės mažėja. Įdėjus 55 % mineralinio priedo, gniuždymo stiprio reikšmė mažėja iki 55,89 MPa, o, padidinus šlako kiekį iki 65 %, mažėja iki 55,01 MPa.



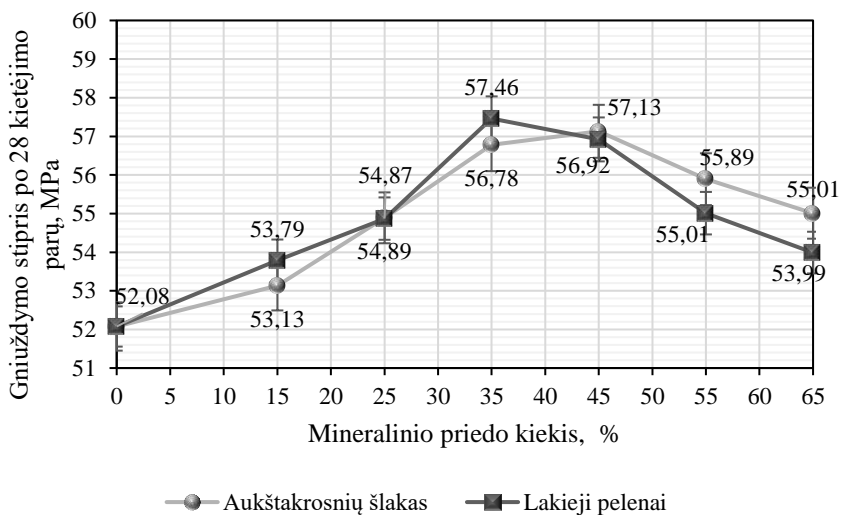
3.23 pav. Betono, kietėjusio 7 paras, gniuždymo stiprio priklausomybė nuo lakiųjų pelenų ir aukštakrosnių šlako priedų kiekio

Fig. 3.23. Relationship between the compressive strength of concrete, fly ash and blast furnace slag after 7 hardening days

Didžiausia gniuždymo stiprio reikšmė nustatyta panaudojus 35 % lakiųjų pelenų priedo ir yra 57,46 MPa, tai yra 10,33 % didesnė reikšmė, lyginant su kontrolinių bandinių vertėmis. Priedo kiekį padidinus iki 45 %, gniuždymo stipris, lyginant su bandiniu, turinčiu 35 % lakiųjų pelenų priedo, mažėja 0,54 MPa ir yra 56,92 MPa. Atlikus tyrimus nustatyta, kad, didinant pelenų kiekį iki 55 % ir maksimalaus tiriamojo 65 % kiekio, gniuždymo stiprio reikšmės po 28 parų kietėjimo mažėja iki 55,01 MPa ir 53,99 MPa.

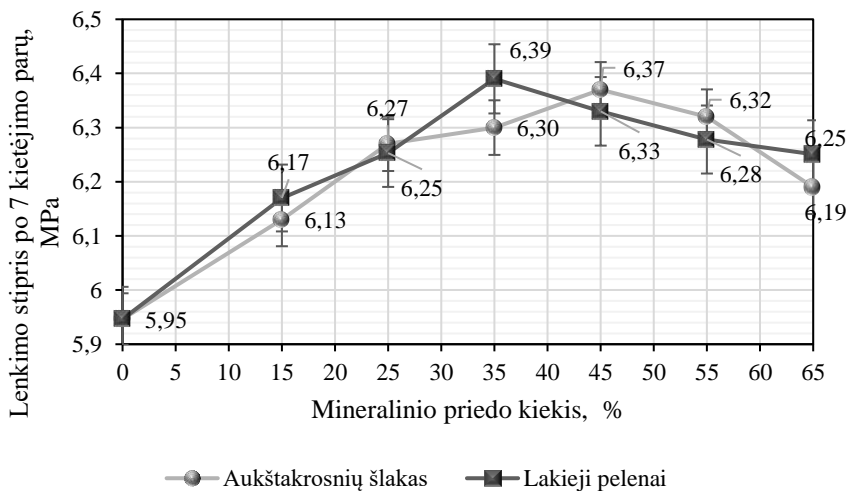
Betono, kietėjusio 7 paras, lenkimo stiprio rezultatai, jį modifikavus aukštakrosnių šlaku ir lakiisiais pelenais, pateikti 3.25 paveiksle. Priedo kiekį padidinus iki 45 %, nustatyta didžiausia lenkimo stiprio reikšmė – 6,37 MPa, ir tai yra 7,06 % pokytis, lyginant su kontroliniu bandiniu be mineralinio priedo. Cementą pakeitus 55 % ir 65 % aukštakrosnių šlaku, lenkimo stiprio reikšmės mažėja iki 6,32 MPa ir 6,19 MPa.

Padidinus mineralinio priedo kiekį iki 35 % nuo rišamosios medžiagos kiekio, nustatytos didžiausios lenkimo stiprio reikšmės, kurios yra lygios 6,39 MPa, ir tai yra 7,39 % daugiau nei kontrolinių bandinių. Lakiųjų pelenų kiekį padidinus iki 45 %, lenkimo stiprio reikšmė mažėja ir yra 6,33 MPa. Cementą pakeitus 55 % ir 65 % mineraliniu priedu, lenkimo stiprio vidutinės reikšmės mažėja iki 52,99 MPa ir 50,75 MPa.



3.24 pav. Betono, kietėjusio 28 paras, gniuždymo stiprio priklausomybė nuo lakiųjų pelenų ir aukštakrosnių šlako priedų kiekio

Fig. 3.24. Relationship between the compressive strength of concrete, fly ash and blast furnace slag after 28 hardening days

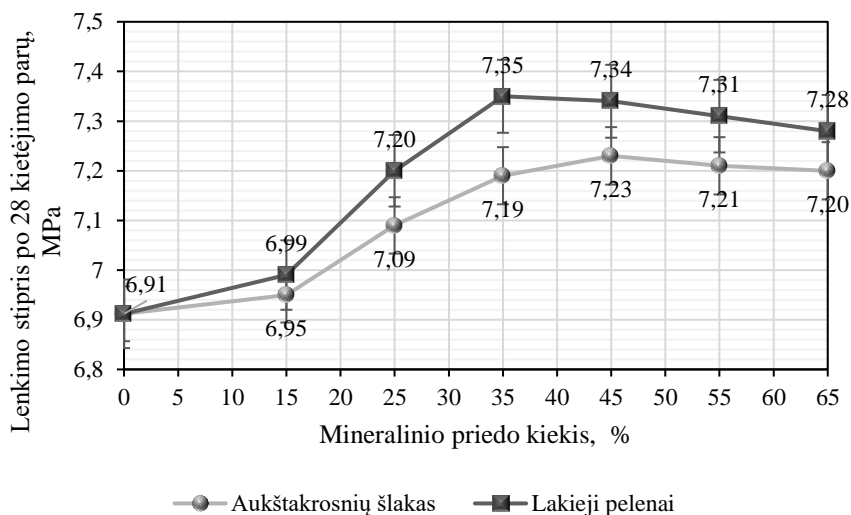


3.25 pav. Betono, kietėjusio 7 paras, lenkimo stiprio priklausomybė nuo lakiųjų pelenų ir aukštakrosnių šlako priedų kiekio

Fig. 3.25. Relationship between the flexural strength of concrete, fly ash and blast furnace slag after 7 hardening days

Betono bandinių su šlako ir pelenų mineraliniu priedu, kietėjusių 28 paras, lenkimo stiprio tyrimo rezultatai pateikiami 3.26 paveiksle. Didžiausia lenkimo stiprio po šio laikotarpio reikšmė nustatyta su 45 % aukštakrosnių šlako aktyviuoju mineraliniu priedu ir yra 7,23 MPa. Tai yra 0,32 MPa daugiau už kontrolinių bandinių reikšmę ir yra 4,63 %. Didinant mineralinio priedo kiekį iki 55 % ir 65 %, lenkimo stiprio reikšmės mažėja. Naudojant 55 % mineralinio priedo, lenkimo stiprio reikšmė mažėja iki 7,21 MPa, o, padidinus šlako kiekį iki 65 %, lenkimo stiprio reikšmė mažėja iki 7,2 MPa.

Didžiausia lenkimo stiprio reikšmė nustatyta panaudojus 35 % lakiųjų pelenų priedo – 7,35 MPa, t. y. 6,37 % didesnis, lyginant su kontrolinių bandinių. Priedo kiekį padidinus iki 45 %, lenkimo stiprio reikšmė, lyginant su bandiniu, turinčiu 35 % lakiųjų pelenų, mažėja 0,44 MPa ir yra 7,34 MPa. Didinant pelenų kiekį iki 55 % ir maksimalaus tiriamojo 65 % kiekio, lenkimo stiprio reikšmės, bandiniams kietėjus 28 paras, mažėja iki 7,31 MPa ir 7,28 MPa.



3.26 pav. Betono, kietėjusio 28 paras, stiprio priklausomybė nuo lakiųjų pelenų ir aukštakrosnių šlako priedų kiekio

Fig. 3.26. Relationship between the flexural strength of concrete, fly ash and blast furnace slag after 28 hardening days

Mineraliniai priedai dėl savo smulkumo, kuris yra mažesnis už naudotų cementų, užpildydami mažiausius tarpus, didina betono tankį, ultragarso impulso sklaidimo greitį bei gniuždymo ir lenkimo stiprius, o vandens įgertį mažina. Betono struktūra tampa vienalytiškesnė, dėl to mažėja porų kiekis ir ryšys tarp užpildo bei cementinės matricos tampa stipresnis.

Į betoną įdėjus 65 % aukštakrosnių šlako, nustatyta mažiausia vandens įgertis, įdėjus 55 % priedo, nustatytas didžiausias tankis ir ultragarso impulso

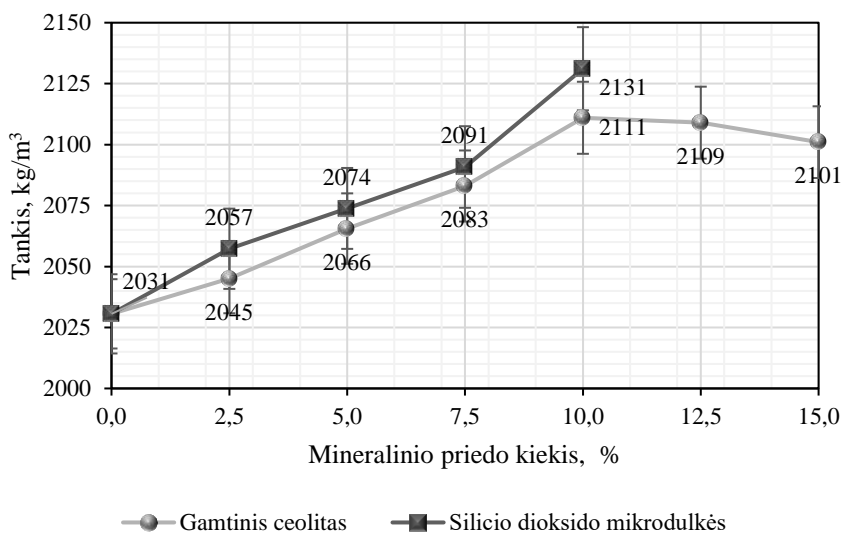
sklidimo greitis. Cementą pakeitus 45 % šlaku, nustatyti didžiausi gniuždymo ir lenkimo stipriai.

Betoną modifikavus 55 % lakiųjų pelenų priedu, nustatyti didžiausias tankis ir UIG po 7 kietėjimo parų bei mažiausia įgertis. Didžiausias UIG po 28 kietėjimo parų nustatytas su 45 % pelenų priedu. Sudėtį modifikavus 35 % lakiųjų pelenų priedu, nustatyti didžiausi gniuždymo ir lenkimo stipriai po 7 ir 28 kietėjimo parų.

Viršijus atitinkamą mineralinio priedo kiekį betone tankio, ultragarso impulso sklidimo greičio bei gniuždymo ir lenkimo stiprių reikšmės mažėja, o vandens įgertis – didėja. Tai paaiškinama per mažu cemento kiekiu (mineralinių priedų perdozavimu), kuris neužtikrina stipraus ryšio tarp užpildo ir cementinės matricos.

3.4.2. Betonų, modifikuotų gamtiniu ceolitu ir silicio dioksido mikrodulkėmis, savybių tyrimai

Atlikus gamtiniu ceolitu ir silicio dioksido mikrodulkėmis modifikuotų betonų tankio tyrimus, nustatyti rezultatai pateikti 3.27 paveiksle.



3.27 pav. Betono tankio priklausomybė nuo silicio dioksido mikrodulkių ir gamtinio ceolito priedų kiekio

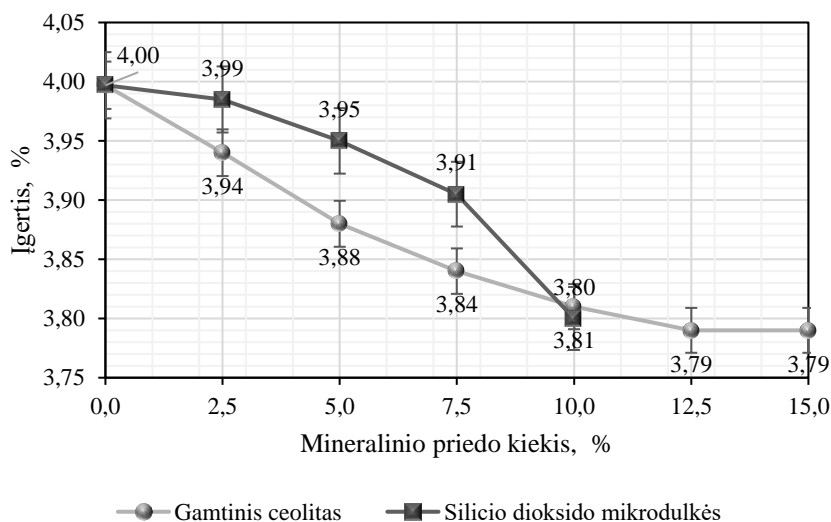
Fig. 3.27. Relationship between the density of concrete, silica fume and natural zeolite

Iš diagramos matoma, kad didžiausias tankis – 2111 kg/m^3 – nustatytas panaudojus 10 % gamtinio ceolito priedo, o mažiausias – 2031 kg/m^3 – nustatytas kontroliniame bandinyje, nenaudojant mineralinio priedo. Tankio reikšmės didėja naudojant gamtinio ceolito iki 10 %, ir tai sudaro 3,94 % (80 kg/m^3). Gamtinio

ceolito kiekį padidinus iki 12,5 %, tankio reikšmė (2109 kg/m^3) mažėja, o kiekį padidinus iki 15 %, tankio reikšmė (2101 kg/m^3) dar labiau mažėja.

Atlikus silicio dioksido mikrodulkėmis modifikuotų betonų tankio tyrimus, nustatyta, kad didžiausias tankis – 2131 kg/m^3 – partijos, kurioje naudota 10 % silicio dioksido mikrodulkių priedo. Nustatyta, kad bandinių tankis tiesiogiai priklauso nuo silicio dioksido mikrodulkių priedo kiekio, t. y. kuo didesnis silicio dioksido mikrodulkių priedo kiekis betono mišinyje, tuo didesnis betono tankis. Maksimalus tankių skirtumas tarp kontrolinių bandinių ir bandinių su 10 % silicio dioksido mikrodulkių priedu yra 100 kg/m^3 , t. y. 4,92 %.

Mineralinių priedų poveikis betono vandens įgerčiai pateikiamas 3.28 paveiksle. Bandiniuose su gamtiniu ceolitu vandens įgerties reikšmės mažėja, didinant mineralinio priedo kiekį. Pakeitus cementą 2,5 % gamtiniu ceolitu, vandens įgerties reikšmė mažėja nuo 4 % iki 3,94 %. Padidinus gamtinio ceolito kiekį iki 5 %, įgerties reikšmė mažėja tiek pat (0,06 %) kaip ir su 2,5 % mineralinio priedo ir yra 3,88 %. Padidinus mineralio priedo kiekį iki 7,5 % ir 10 %, vandens įgerties reikšmės mažėja iki 3,84 % ir 3,81 %. Modifikavus betono sudėtį 12,5 % gamtiniu ceolitu, įgerties reikšmė mažėja, tačiau dar mažiau nei su 10 %, o, padidinus mineralinio priedo kiekį iki maksimalaus 15 % kiekio, vandens įgerties reikšmė nekinta ir išlieka tokia pati.

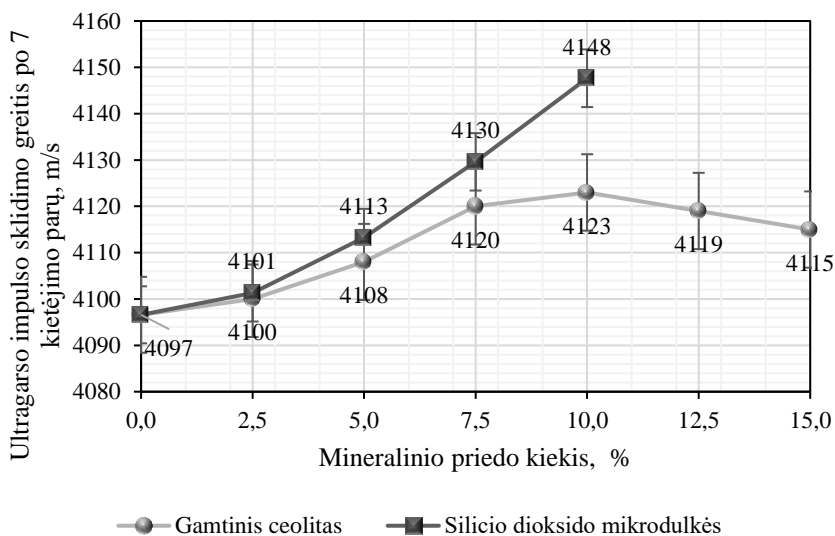


3.28 pav. Betono vandens įgerties priklausomybė nuo silicio dioksido mikrodulkių ir gamtinio ceolito priedų kiekio

Fig. 3.28. Relationship between the water absorption of concrete, silica fume and natural zeolite

Į betono mišinį įdėjus silicio dioksido mikrodulkių priedą, vandens įgerties reikšmės mažėja. Rišamąją medžiagą pakeitus 2,5 % silicio dioksido mikrodulkėmis, nustatytas minimalus 0,01 % vandens įgerties reikšmės (3,99 %) mažėjimas. Padidinus silicio dioksido mikrodulkių kiekį iki 5 % ir 7,5 %, vandens įgerties reikšmės mažėja iki 3,95 % ir 3,91 %. Maksimaliai padidinus silicio dioksido mikrodulkių kiekį iki 10 %, nustatyta pati mažiausia vandens įgerties reikšmė – 3,8 %, o tai yra 0,2 % mažiau už kontrolinių bandinių įgertį.

Atlikus tyrimus nustatytas mineralinių priedų kiekio poveikis ultragarso impulso sklidimo greičiui betono bandiniuose, kuris pateiktas 3.29 paveiksle. Įdėjus į betoną 2,5 % gamtinio ceolito, nustatytas labai nežymus poveikis, betono UIG yra 4100 m/s. Didesnis UIG reikšmės didėjimas nustatytas cementą pakeitus 7,5 % mineraliniu priedu. Ultragarso impulso sklidimo greičio reikšmė padidėja 0,56 % ir yra 4120 m/s. Didžiausias UIG 4123 m/s nustatytas bandinių su 10 % gamtinio ceolito priedu, ir tai yra 0,63 % daugiau, lyginant su kontroliniu bandiniu be mineralinių priedų. Didinant gamtinio ceolito kiekį, UIG reikšmės mažėja. Betoną modifikavus 12,5 % ir 15 % mineraliniu priedu, UIG yra 4119 m/s ir 4115 m/s.



3.29 pav. Betono, kietėjusio 7 paras, ultragarso impulso sklidimo priklausomybė nuo silicio dioksido mikrodulkių ir gamtinio ceolito priedų kiekio

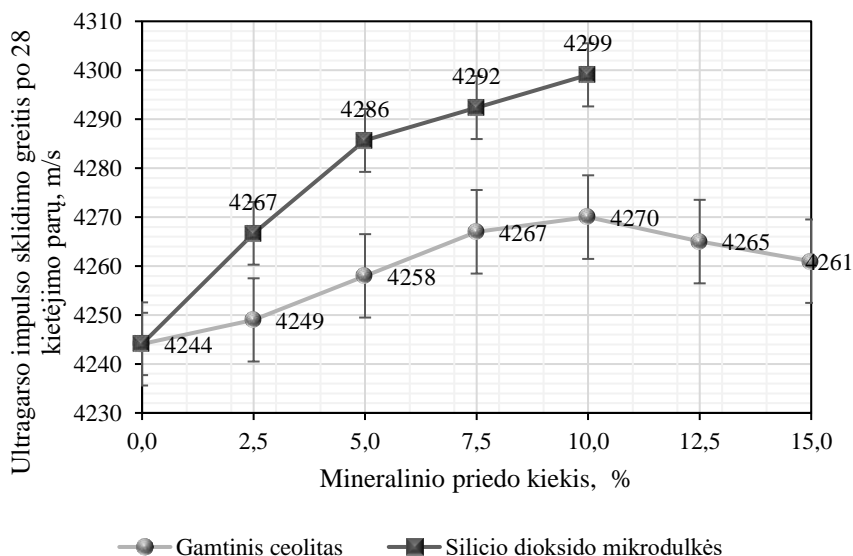
Fig. 3.29. Relationship between the ultrasonic pulse propagation velocity of concrete, silica fume and natural zeolite after 7 hardening days

Modifikavus betono mišinį 2,5 % silicio dioksido mikrodulkėmis, UIG reikšmė didėja ir yra 4101 m/s. Padidinus silicio dioksido mikrodulkių kiekį iki 5 %, UIG reikšmė padidėja 0,39 % ir yra 4113 m/s. Rišamąją medžiagą keičiant

7,5 % mineraliniu priedu, ultragarso impulso sklaidimo greičio reikšmė didėja ir yra 4130 m/s. Pakeitus cementą maksimaliu 10 % silicio dioksido mikrodulkių kiekiu, nustatytas didžiausias UIG – 4148 m/s.

Atlikti betono, kietėjusio 28 paras, ultragarso impulso sklaidimo greičio nustatymo tyrimai. Rezultatai pateikiami 3.30 paveiksle. Mineralinio priedo kiekį padidinus iki 5 % ir 7,5 %, ultragarso impulso sklaidimo greičio reikšmės didėjo iki 4258 m/s ir 4267 m/s bei padidėjo 0,33 % ir 0,54 %, lyginant su kontroliniu bandiniu. Maksimalus UIG nustatytas su 10 % mineralinio priedo ir yra 4270 m/s, tai sudarė 0,61 % daugiau už betono bandinius be mineralinių priedų. Didinant gamtinio ceolito kiekį, UIG reikšmės mažėja. Cementą pakeitus 12,5 % ir 15 % gamtinio ceolito ultragarso impulso sklaidimo greičio reikšmės mažėja iki 4265 m/s ir 4261 m/s.

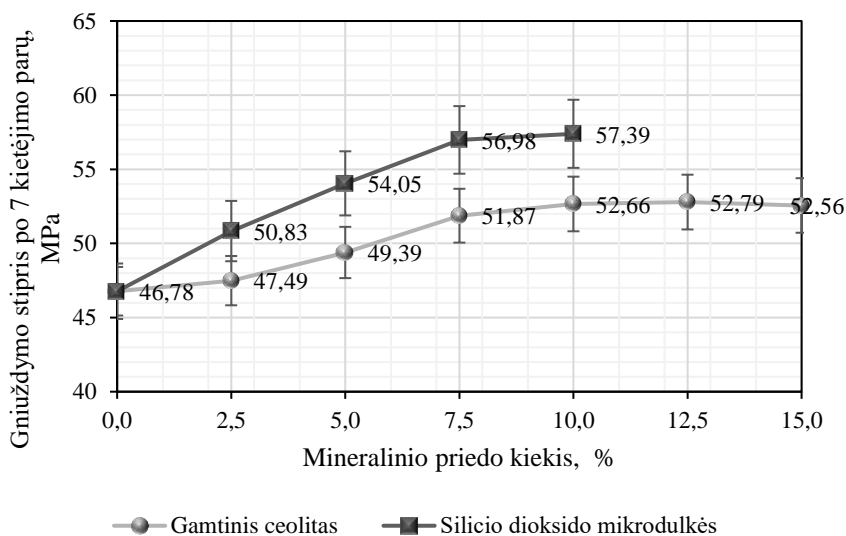
I betono mišinį įdėjus 2,5 % SiO_2 mikrodulkių, ultragarso impulso sklaidimo greičio reikšmė didėja ir yra 4267 m/s, tai yra 0,54 % padidėjimas, lyginant su kontroliniu bandiniu. Padidinus mineralinio priedo kiekį iki 5 %, UIG reikšmė padidėja 0,99 % ir yra 4286 m/s. 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių pakeičiant rišamąją medžiagą, nustatytas 4130 m/s ultragarso impulso sklaidimo greitis, ir tai yra 1,13 % daugiau už kontrolinio bandinio UIG. Didžiausias ultragarso impulso sklaidimo greitis – 4299 m/s – nustatytas su 10 % maksimaliu tiriamuoju mineralinio priedo kiekiu.



3.30 pav. Betono, kietėjusio 28 paras, ultragarso impulso sklaidimo greičio priklausomybė nuo silicio dioksido mikrodulkių ir gamtinio ceolito priedų kiekio
Fig. 3.30. Relationship between the ultrasonic pulse propagation velocity of concrete, silica fume and natural zeolite after 28 hardening days

Betono, kietėjusio 7 paras, gniuždymo stiprio priklausomybė nuo silicio dioksido mikrodulkių ir gamtinio ceolito priedų kiekio pateikta 3.31 paveiksle. Kontrolinių bandinių gniuždymo stiprio vidurkio reikšmė yra 46,78 MPa. Didinant mineralinio priedo kiekį, gniuždymo stiprio reikšmės tolygiai didėja iki 12,5 % mineralinio priedo kiekio ribos. Didžiausia gniuždymo stiprio vertė, kuri yra 6,01 MPa didesnė už kontrolinio bandinio vertę, ir tai sudaro 12,85 % pokytį, nustatyta cementą pakeitus 12,5 % mineraliniu priedu. Panaudojus maksimalų tiriamą gamtinio ceolito kiekį, kuris sudaro 15 % nuo cemento masės, gniuždymo stiprio reikšmė, bandiniui kietėjus 7 paras, mažėja, ir yra 52,56 MPa.

Rišamąją medžiagą pakeitus 2,5 % SiO_2 mikrodulkėmis, nustatytas 4,05 MPa pokytis, lyginant su kontroliniu bandiniu, o gniuždymo stipris yra 50,83 MPa. Modifikavus betoną 5 % silicio dioksido mikrodulkėmis, gniuždymo stipris yra 54,05 MPa, o skirtumas, lyginant su kontroliniu bandiniu, yra 7,27 MPa. Silicio dioksido mikrodulkių kiekį padidinus iki 7,5 %, gniuždymo stipris yra 56,98 MPa. Įdėjus maksimalų 10 % mineralinio priedo kiekį, gniuždymo stipris po 7 parų yra 57,39 MPa, ir tai yra 22,68 % daugiau, lyginant su kontroliniu bandiniu be silicio dioksido mikrodulkių.



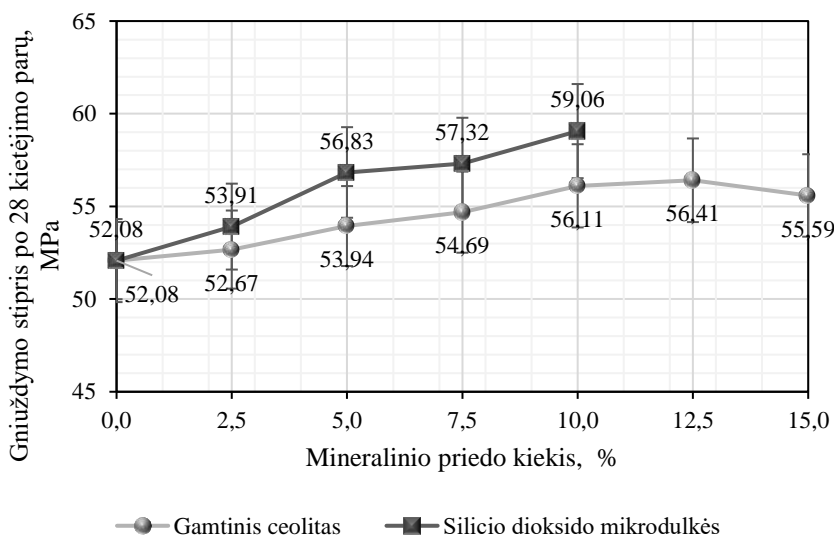
3.31 pav. Betono, kietėjusio 7 paras, gniuždymo stiprio priklausomybė nuo silicio dioksido mikrodulkių ir gamtinio ceolito priedų kiekio

Fig. 3.31. Relationship between the compressive strength of concrete, silica fume and natural zeolite after 7 hardening days

Betono, kietėjusio 28 paras, gniuždymo stiprio priklausomybė nuo silicio dioksido mikrodulkių ir gamtinio ceolito priedų kiekio pateikta 3.32 paveiksle. Gniuždymo stiprio reikšmės didėja didinant mineralinio priedo kiekį iki 12,5 %.

Didžiausia gniuždymo stiprio reikšmė (56,41 MPa) nustatyta panaudojus 12,5 % gamtinio ceolito ir tai yra 3,61 MPa (8,31 %) daugiau negu kontrolinio bandinio. Panaudojus maksimalų numatytą gamtinio ceolito kiekį (15 %), gniuždymo stiprio reikšmė (55,59 MPa) yra 0,82 MPa mažesnė negu panaudojus 12,5 % mineralinio priedo.

Didinant aktyviojo mineralinio priedo kiekį, gniuždymo stiprio reikšmės didėja. Cementą pakeitus 2,5 % silicio dioksido mikrodulkėmis, gniuždymo stiprio reikšmė padidėja 3,51 %, t.y. nuo 52,08 MPa (kontrolinis bandinys) iki 53,91 MPa. Pakeitus rišamąją medžiagą 5 % ir 7,5 % silicio dioksido mikrodulkėmis, gniuždymo stiprio reikšmės padidėja 9,12 % ir 10,06 % bei yra 56,83 MPa ir 57,32 MPa. Didžiausia gniuždymo stiprio reikšmė (59,06 MPa) nustatyta su didžiausiu silicio dioksido mikrodulkių mineralinio priedo kiekiu (10 %) ir yra 13,4 % didesnė, lyginant su kontroliniu bandiniu.



3.32 pav. Betono, kietėjusio 28 paras, gniuždymo stiprio priklausomybė nuo silicio dioksido mikrodulkių ir gamtinio ceolito priedų kiekio

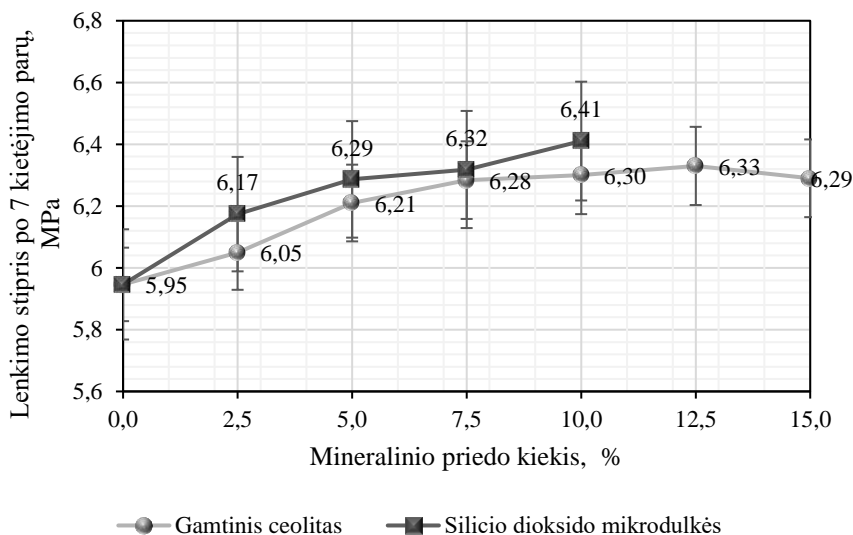
Fig. 3.32. Relationship between the compressive strength of concrete, silica fume and natural zeolite after 28 hardening days

Betono bandinių su gamtiniu ceolitu ir SiO_2 mikrodulkėmis, kietėjusių 7 paras, lenkimo stiprio priklausomybės nuo priedų kiekio pateiktos 3.33 paveiksle. Didinant mineralinio priedo kiekį, lenkimo stiprio reikšmės tolygiai didėja iki 12,5 % mineralinio priedo kiekio ribos. Didžiausia lenkimo stiprio vertė, kuri yra 0,38 MPa didesnė už kontrolinio bandinio vertę, ir tai sudaro 6,39 % pokytį, nustatyta modifikavus betoną 12,5 % gamtiniu ceolitu. Naudojant maksimalų tiriamą

gamtinio ceolito kiekį, kuris sudaro 15 % nuo cemento kiekio, lenkimo stiprio reikšmė mažėja ir yra lygi 6,29 MPa.

Cementą pakeitus 2,5 % SiO_2 mikrodulkėmis, nustatytas 0,22 MPa pokytis, lyginant su kontroliniu bandiniu, o lenkimo stiprio reikšmė yra 6,7 MPa. Modifikavus betoną 5 % silicio dioksido mikrodulkėmis, lenkimo stiprio reikšmė yra 6,29 MPa, o skirtumas, lyginant su kontroliniu bandiniu, yra 0,34 MPa. Silicio dioksido mikrodulkių kiekį padidinus iki 7,5 %, lenkimo stiprio reikšmė yra 6,32 MPa. Su maksimaliu 10 % mineralinio priedo kiekiu lenkimo stipris po 7 parų kietėjimo yra 6,41 MPa, o tai yra 7,73 % daugiau, lyginant su kontroliniu bandiniu be silicio dioksido mikrodulkių mineralinio priedo.

Bandinių, kietėjusių 28 paras, lenkimo stiprio priklausomybė nuo priedų kiekio pateikta 3.34 paveiksle. Lenkimo stiprio reikšmės didėja, didinant mineralinio priedo kiekį iki 12,5 %. Kontrolinio bandinio be mineralinių priedų lenkimo stipris yra 6,91 MPa. Didžiausias lenkimo stipris (7,19 MPa) nustatytas panaudojus 12,5 % gamtinio ceolito, ir tai yra 0,28 MPa daugiau negu kontrolinio bandinio, kas sudaro 4,05 %. Panaudojus maksimalų numatytą gamtinio ceolito kiekį (15 %), lenkimo stiprio reikšmė mažėja 0,01 MPa, lyginant su bandiniais, kuriuose yra 12,5 % mineralinio priedo, ir yra 7,18 MPa.



3.33 pav. Betono kietėjusio 7 paras, lenkimo stiprio priklausomybė nuo silicio dioksido mikrodulkių ir gamtinio ceolito priedų kiekio

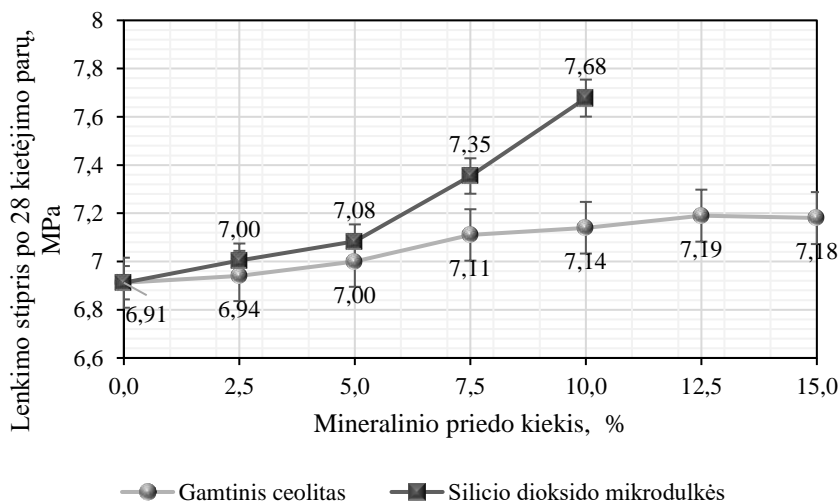
Fig. 3.33. Relationship between the flexural strength of concrete, silica fume and natural zeolite after 7 hardening days

Rišamąją medžiagą pakeitus 2,5 % silicio dioksido mikrodulkėmis, lenkimo stiprio reikšmė padidėja 1,3 % ir yra lygi 7 MPa. Padidinus aktyviojo mineralinio

priedo kiekį iki 5 %, lenkimo stipris didėja iki 7,08 MPa. Modifikavus betono mišinį 7,5 % mikrodulkėmis, lenkimo stiprio reikšmė didėja iki 7,35 %, tai yra 6,37 % daugiau už kontrolinio bandinio. Padidinus silicio dioksido mikrodulkių kiekį iki maksimalaus tiriamo 10 % kiekio, nustatytos didžiausios lenkimo stiprio reikšmės – 7,68 MPa, tai yra net 11,4 % daugiau už kontrolinių bandinių.

Silicio dioksido mikrodulkės ir gamtinis ceolitas užpildo mažus tarpus betono struktūroje ir tokiu būdu didina betono tankį, ultragarso impulso sklaidimo greitį bei gniuždymo ir lenkimo stiprius, o vandens įgertį mažina. Betono struktūra tampa vienalytiškesnė, dėl to mažėja porų kiekis ir ryšys tarp užpildo bei cementinės matricos tampa stipresnis.

Betono sudėtį modifikavus 10 % silicio dioksido mikrodulkėmis, nustatytos didžiausios tankio, ultragarso impulso sklaidimo greičio bei gniuždymo ir lenkimo stiprių reikšmės, o vandens įgerties reikšmės – mažiausios. Su 10 % gamtinio ceolito priedu nustatyti didžiausias tankis ir UIG, bandiniui kietėjus 7 ir 28 paras. Naudojant 12,5 % gamtinio ceolito priedo, nustatyti didžiausi gniuždymo ir lenkimo stipriai po 7 ir 28 kietėjimo parų bei mažiausia vandens įgertis.



3.34 pav. Betono, kietėjusio 28 paras, lenkimo stiprio priklausomybė nuo silicio dioksido mikrodulkių ir gamtinio ceolito priedų kiekio

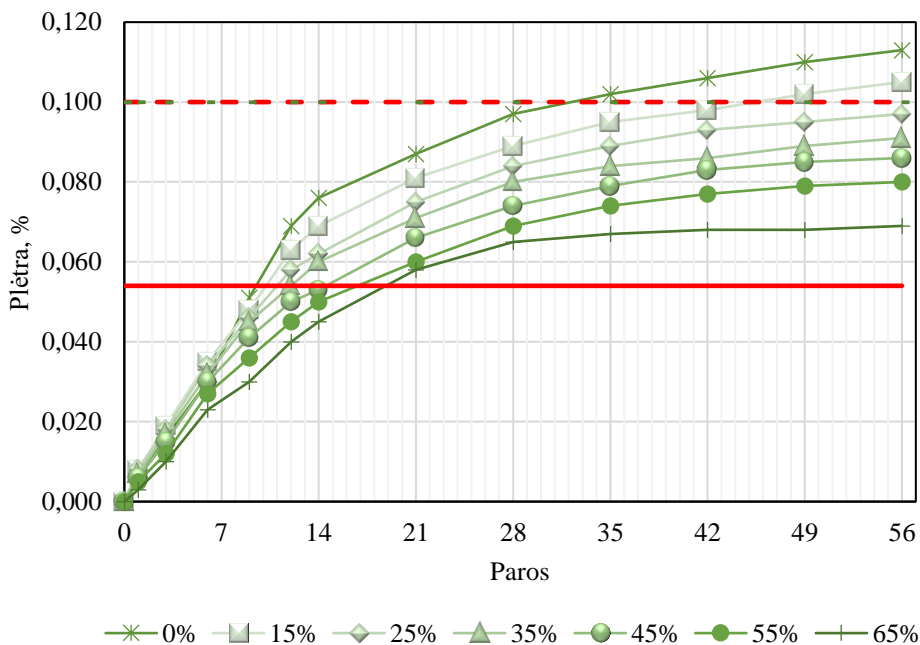
Fig. 3.34. Relationship between the flexural strength of concrete, silica fume and natural zeolite after 28 hardening days

Viršijus atitinkamą mineralinio priedo kiekį betone tankio, ultragarso impulso sklaidimo greičio bei gniuždymo ir lenkimo stiprių reikšmės mažėja, o vandens įgerties – didėja. Tai paaiškinama per mažu cemento kiekiu (mineralinių priedų perdozavimu), kuris neužtikrina stipraus ryšio tarp užpildo ir cementinės matricos.

3.5. Mineraliniais priedais modifikuotų betonų šarminės korozijos tyrimai

3.5.1. Mineralinių priedų poveikis betono šarminei korozijai

Betono modifikuoto lakiųjų pelenų priedu plėtros priklausomybė nuo priedo kiekio pateikta 3.35 paveiksle. Cementą pakeitus 15 % lakiųjų pelenų priedu, betono bandinių plėtra po 14 bandymo parų viršija 0,054 % ribą ir yra 0,069 %. Padidinus lakiųjų pelenų kiekį iki 25 % ir 35 %, bandinių plėtros viršija kritinę ribą ir yra lygios 0,062 % ir 0,06 %. Vidutinė nustatyta bandinių plėtra, neviršijanti leidžiamosios ribos, po 14 parų bandymo panaudojus 45 % (0,053 %) lakiųjų pelenų priedą. Mineralinio priedo kiekį padidinus iki 55 % ir 65 %, bandinių plėtros reikšmės yra 0,05 % ir 0,045 %.



3.35 pav. Betono bandinių, modifikuotų lakiisiais pelenais ir išlaikytų 56 paras 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, plėtros priklausomybė nuo priedo kiekio

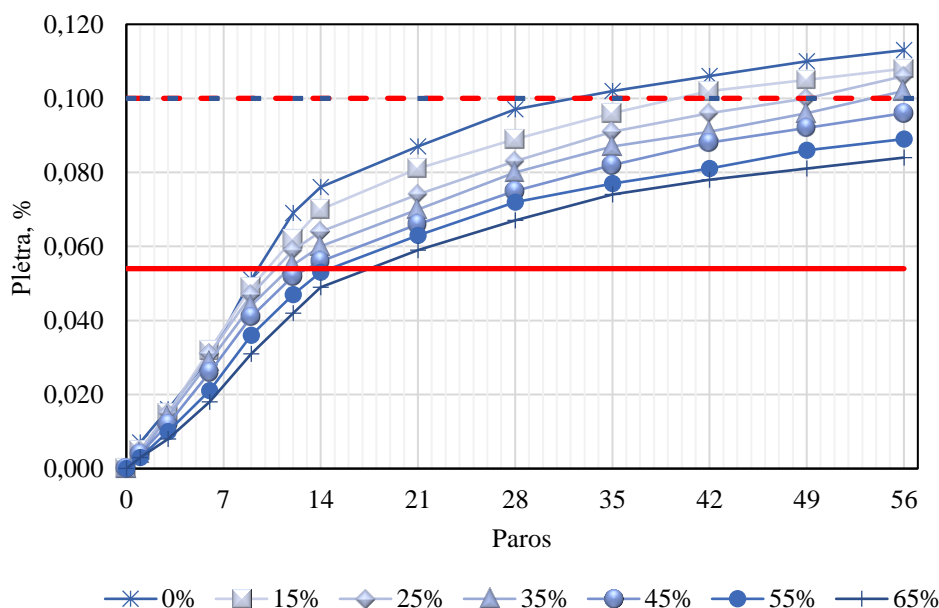
Fig. 3.35. Relationship between the expansion of concrete modified with fly ash specimens conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days and the amount of mineral admixtures

Po 56 bandymo parų, nustatyta, kad, panaudojus lakiųjų pelenų mineralinį priedą, gautos dar mažesnės plėtros reikšmės. Atlikus tyrimus nustatyta, kad

0,1 % kritinė plėtros riba viršyta tik panaudojus 15 % pelenų (0,105 %) priedo. Betono mišinyje cementą pakeitus 25 % mineraliniu priedu, plėtra yra 0,097 %, o lakiųjų pelenų kiekį padidinus iki 35 % ir 45 % vidutinės bandinių plėtros reikšmės yra 0,091 % ir 0,086 %. Lakiųjų pelenų kiekį padidinus iki 55 % ribos, plėtros reikšmė dar labiau mažėja ir yra 0,08 %. Betono sudėtį modifikavus maksimaliu 65 % lakiųjų pelenų kiekiu bandinių plėtros reikšmės beveik nekinta nuo 35 bandymo paros (plėtra 0,067 %) iki tyrimo pabaigos (plėtra 0,069 %).

Betono mišinį modifikavus įvairiais lakiųjų pelenų kiekiais nustatyta, kad ribinis mineralinio priedo kiekis, juo pakeičiant dalį rišamosios medžiagos, yra 45 %, nes betono bandinių vidutinė plėtra po 14 parų bandymo yra 0,053 %, o po 56 bandymo parų – 0,086 %. Abi šios plėtros reikšmės neviršijo leidžiamųjų plėtros reikšmių po 14 ir 56 bandymo parų, išlaikius betoną 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale.

Betono bandinių, modifikuotų aukštakrosnių šlako mineraliniu priedu, plėtros priklausomybė nuo priedų kiekio pateikta 3.36 paveiksle.



3.36 pav. Betono, modifikuoto aukštakrosnių šlaku ir 56 paras išlaikyto 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, plėtros priklausomybė nuo priedo kiekio

Fig. 3.36. Relationship between the expansion of concrete modified with blast furnace slag specimens conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days and the amount of mineral admixtures

Išlaikius bandinius 14 parų 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale pasireiškė plėtra. Kontrolinio bandinio be mineralinių priedų plėtros reikšmė yra 0,076 %, o rišamąją medžiagą pakeitus 15 % aukštakrosnių šlaku plėtros reikšmė mažėjo, lyginant su kontrolinių bandinių ir yra 0,07 %. Padidinus mineralinio priedo kiekį iki 25 % ir 35 %, plėtros po 14 bandymo parų yra 0,064 % ir 0,06 %. Betoną modifikavus 45 % aukštakrosnių šlako priedu, bandinių vidutinė plėtra yra 0,056 %. Didinant aukštakrosnių šlako kiekį iki 55 % ir 65 %, bandinių plėtra neviršija ribinės 0,054 % reikšmės ir yra 0,053 % ir 0,049 %.

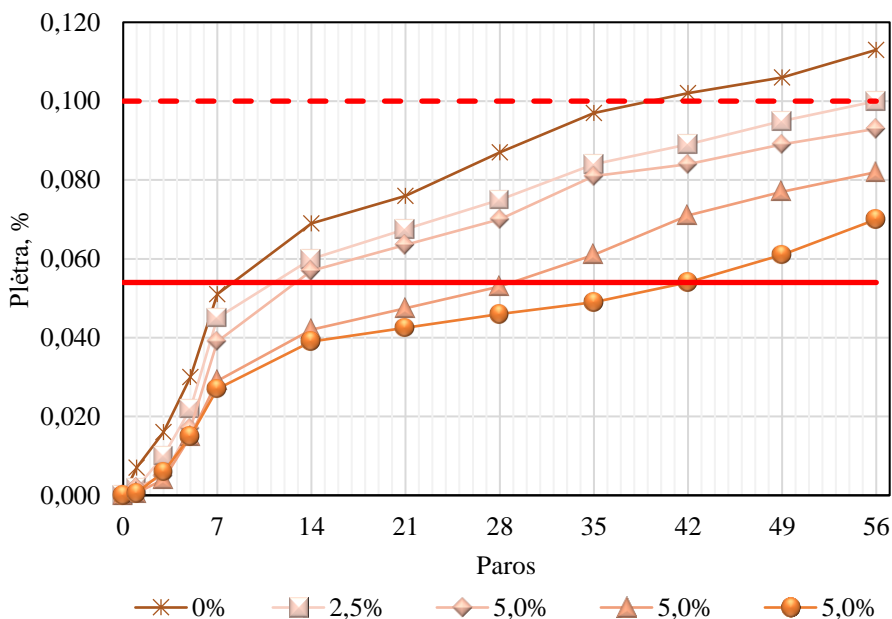
Kontrolinio bandinio be mineralinių priedų plėtros reikšmė (0,113 %) po 56 bandymo parų viršijo 0,1 % ribą. Betono bandinių, modifikuotų 15 %, 25 % ir 35 % aukštakrosnių šlaku ir išlaikytų 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, vidutinės plėtros reikšmės viršijo ribinę vertę ir yra 0,108 %, 0,106 % ir 0,102 %. Kritinė riba nebuvo pasiekta rišamąją medžiagą pakeitus 45 % mineraliniu priedu, kai vidutinė bandinių plėtra lygi 0,096 %. Šlako kiekį padidinus iki 55 % ir iki maksimalaus 65 % kiekio, plėtros reikšmės yra 0,089 %, 0,084 %.

Atlikus tyrimus nustatyta, kad, naudojant reaktyvius užpildus ir cementą be mineralinių priedų CEM I 42,5 R, ribinis mineralinio priedo (aukštakrosnių šlako) kiekis betone yra 55 %. Rišamąją medžiagą pakeitus 55 % aukštakrosnių šlaku, vidutinė bandinių plėtra po 14 bandymo parų yra 0,053 %, o po 56 bandymo parų – 0,089 %, kurios neviršija kritinių leidžiamųjų 0,054 % ir 0,1 % plėtros ribų.

Betono bandinių su CEM I 42,5 R tipo cementu ir silicio dioksido mikrodulkių priedu plėtros priklausomybė nuo priedo kiekio, išlaikius bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale iki 56 parų, pateikta 3.37 paveiksle. Nustatytas nuolatinis plėtros didėjimas.

Atlikus tyrimus nustatyta, kad po 14 parų bandymo bandinių su 0 %, 2,5 % ir 5,0 % silicio dioksido mikrodulkių priedo kiekiu vidutinės plėtros reikšmės viršijo leidžiamąją 0,054 % plėtros ribą. Betono bandiniuose pakeitus cementą 7,5 % ir 10,0 % silicio dioksido mikrodulkių priedu (rišamąją medžiagą keičiant silicio dioksido mikrodulkėmis), po 14 parų bandymo nustatytos 0,039 % ir 0,042 % plėtros reikšmės.

Tęsiant tyrimą iki 56 parų, laikant bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, nustatyta, kad kontrolinio bandinio be mineralinių priedų plėtra viršijo 0,1 % kritinę ribą ir yra 0,113 %, o bandinių, modifikuotų 2,5 % silicio dioksido mikrodulkėmis, plėtra lygi kritinei plėtros ribai – 0,1 %. Panaudojus 5 % ir 7,5 % mineralinio priedo, plėtros reikšmės mažėjo ir po 56 parų bandymų yra 0,093 % ir 0,082 %. Mažiausia bandinių plėtra nustatyta su didžiausiu silicio dioksido mikrodulkių kiekiu – 10 %. Plėtra po 56 bandymo parų, išlaikius bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, yra 0,07 %.

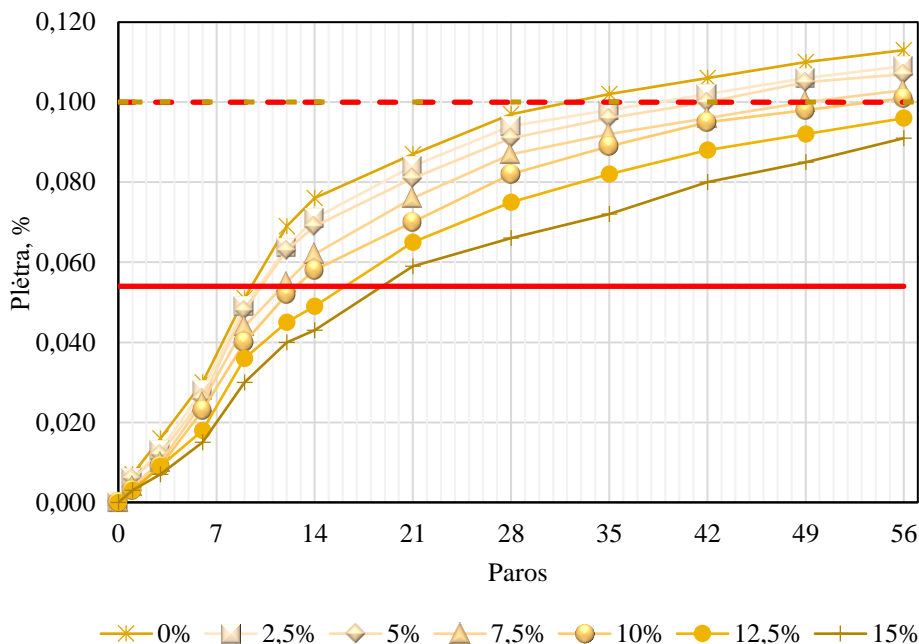


3.37 pav. Betono, modifikuoto silicio dioksido mikrodulkėmis ir išlaikyto 56 paras 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, plėtros priklausomybė nuo priedo kiekio

Fig. 3.37. Relationship between the expansion of concrete modified with silica fume specimens conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days and the amount of mineral admixtures

Pagal taikytą tyrimų metodiką nustatyta, kad ribinis silicio dioksido mikrodulkių kiekis betono mišinyje, naudojant tirtus reaktyviusius užpildus ir cementą be mineralinių priedų CEM I 42,5 R, yra 7,5 %. Modifikavus betono mišinį 7,5 % silicio dioksido mikrodulkėmis, vidutinė bandinių plėtra po 14 ir 56 bandymo parų neviršijo kritinių leidžiamųjų 0,054 % ir 0,1 % plėtros ribų.

3.38 paveiksle pateikiama plėtros priklausomybė nuo gamtinio ceolito priedo kiekio. Cementą pakeitus 2,5 % ir 5 % gamtinio ceolito priedu, po 14 bandymo parų bandinių plėtros reikšmės yra mažesnės, lyginant su kontrolinių bandinių plėtra (0,076 %), ir yra 0,071 % ir 0,069 %. Betono bandinių, modifikuotų 7,5 % ir 10 % mineraliniu priedu, plėtros reikšmės taip pat viršija 0,054 % ribą bei yra 0,062 % ir 0,058 %. Padidinus gamtinio ceolito kiekį iki 12,5 %, plėtra nebeviršija leidžiamosios ribos po 14 bandymo parų ir yra lygi 0,049 %. Maksimaliu numatytu ceolito 15 % kiekiu modifikavus betono sudėtį, vidutinė bandinių plėtra yra 0,043 %.



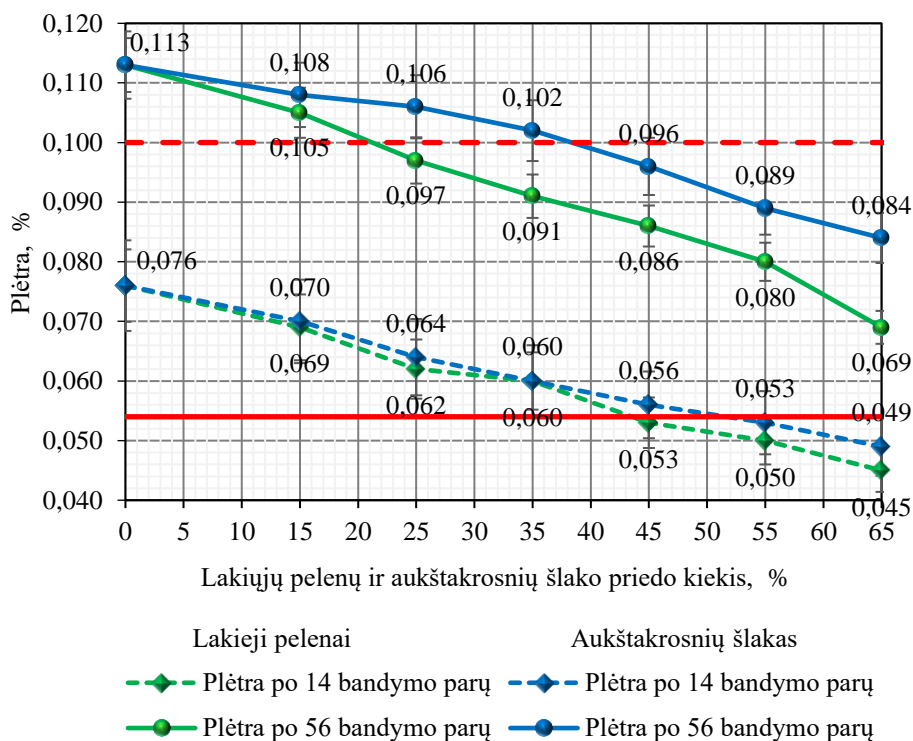
3.38 pav. Betono, modifikuoto gamtiniu ceolitu ir 56 paras išlaikyto 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, plėtros priklausomybė nuo priedo kiekio

Fig. 3.38. Relationship between the expansion of concrete modified with natural zeolite specimens conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days and the amount of mineral admixtures

Toliau vykdant bandinių plėtros tyrimus iki 56 bandymo parų, visų betono bandinių plėtros reikšmės didėja. Rišamąją medžiagą pakeitus 2,5 % gamtiniu ceolitu, plėtra po 56 bandymo parų nustatyta 0,109 %. Mineralinio priedo kiekį didinant iki 5 % ir 7,5 %, plėtros reikšmės mažėja ir yra lygios 0,107 % ir 0,103 %. Pridėjus 10 % gamtinio ceolito, priedo plėtra šiek tiek viršija 0,1 % kritinę ribą ir yra 0,101 %. Cementą pakeitus 12,5 % ir 15 % mineraliniu priedu, bandinių, 56 paras išlaikytų 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, plėtros reikšmės mažėja iki 0,096 % ir 0,091 %.

Nustatyta, kad cementą pakeitus 12,5 % gamtiniu ceolitu, betono bandinių plėtros, po 14 ir 56 bandymo parų 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, neviršija leidžiamųjų 0,054 % ir 0,1 % plėtros ribų.

3.39 ir 3.40 paveiksluose pateiktos lyginamosios modifikuotų betonų, išlaikytų 14 ir 56 paras 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, plėtros priklausomybės nuo mineralinio priedo kiekio.



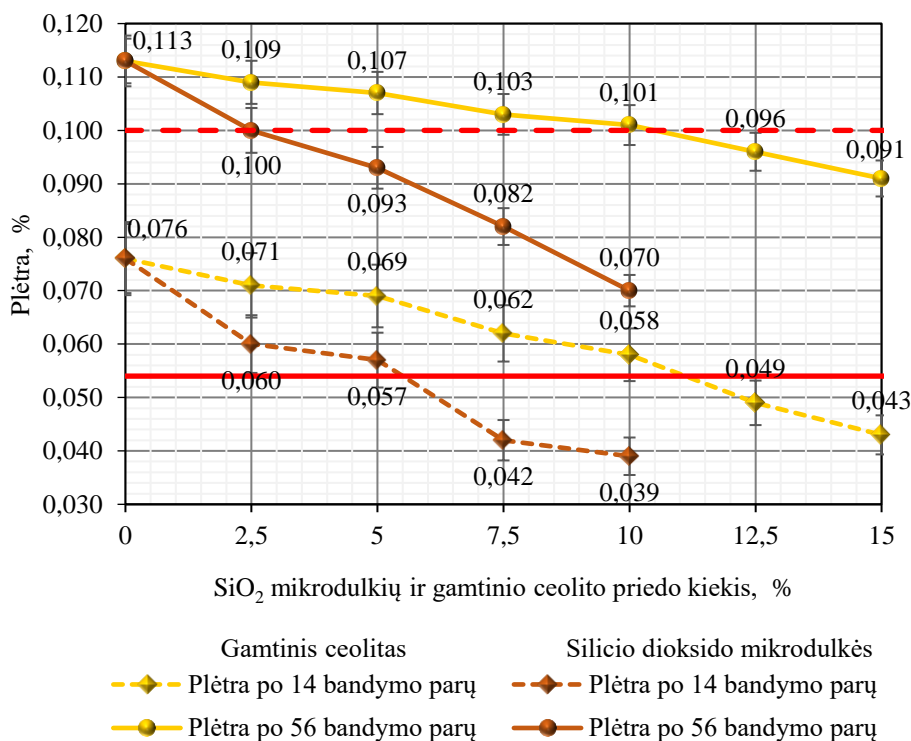
3.39 pav. Betono bandinių, išlaikytų 14 ir 56 bandymo paras 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, plėtros priklausomybė nuo mineralinių priedų kiekio

Fig. 3.39. Relationship between the expansion of concrete specimens conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 14 and 56 days and the amount of mineral admixtures

Atlikus tyrimus su skirtingais mineraliniais priedais ir jų kiekiais, nustatyta, kad absoliučiai mažiausia betono bandinių plėtra yra naudojant lakiuosius pelenus, kuriais keičiama 65 % rišamosios medžiagos (CEM I 42,5 R). Nustatyta, kad lakieji pelenai daro didžiausią teigiamą poveikį betonui su tirtais reaktyviaisiais užpildais, esant betono šarminiai korozijai palankiomis eksploatacinėmis sąlygomis.

Modifikuotų betonų šarminės korozijos sukelta plėtra po 14 ir 56 bandymo parų išlaikant bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, priklauso nuo tirtų mineralinių priedų kiekio ir juose esančio silicio dioksido kiekio.

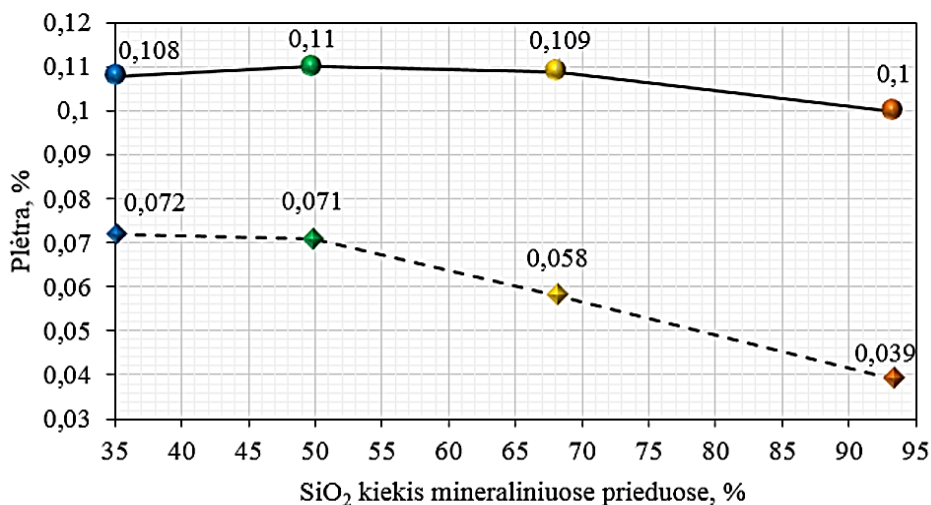
Esant didesniai aktyviojo mineralinio priedo kiekiui, betono mišinyje sureaguoja didesnis kiekis šarmų, esančių cemente, tokiu būdu mažinami reaktyviųjų užpildų ir šarmų reakcijos produkto kiekis bei betono plėtra.



3.40 pav. Betono, išlaikyto 14 ir 56 bandymo paras 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, plėtros priklausomybė nuo mineralinių priedų kiekio

Fig. 3.40. Relationship between the expansion of concrete specimens conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 14 and 56 days and the amount of mineral admixtures

10 % cemento pakeitus mineraliniais priedais, modifikuoto betono bandinių, išlaikytų 14 ir 56 paras 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, plėtros priklausomybė nuo SiO₂ kiekio mineraliniuose prieduose pateikiama 3.41 paveiksle. Silicio dioksido aukštakrosnių šlake yra 35,1 %, lakiuosiuose pelenuose – 49,8 %, gamtiniame ceolite – 68,15 %, o silicio dioksido mikrodulkėse – 93,35 %. Panaudojus vienodą kiekį mineralinių priedų, kuriuose yra skirtingas silicio dioksido kiekis, betono plėtros skiriasi, tai rodo plėtros priklausomybė po 14 bandymo parų, o po 56 bandymo parų plėtrų skirtumai yra nedideli. Tai paaiškinama greitai reaguojančios reaktyviosios opokos kiekiu užpilde, kurios yra beveik du kartus daugiau nei lėtai reaguojančios reaktyviojo titnago uolienos. Mineraliniais priedais modifikuoto betono su reaktyviaisiais tirtais užpildais atsparumas šarminiai korozijai priklauso nuo SiO₂ kiekio mineraliniuose prieduose: kuo didesnis SiO₂ kiekis, tuo plėtra mažesnė ir betonas atsparesnis šarminiai korozijai.



Plėtra po 14 bandymo parų

◆ Aukštakrosnių šlakas

◆ Lakieji pelenai

◆ Gamtinis ceolitas

◆ Silicio dioksido mikrodulkės

Plėtra po 56 bandymo parų

● Aukštakrosnių šlakas

● Lakieji pelenai

● Gamtinis ceolitas

● Silicio dioksido mikrodulkės

3.41 pav. Betono bandinių, išlaikytų 14 ir 56 bandymo paras 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, plėtros priklausomybė nuo SiO₂ kiekio mineraliniuose prieduose

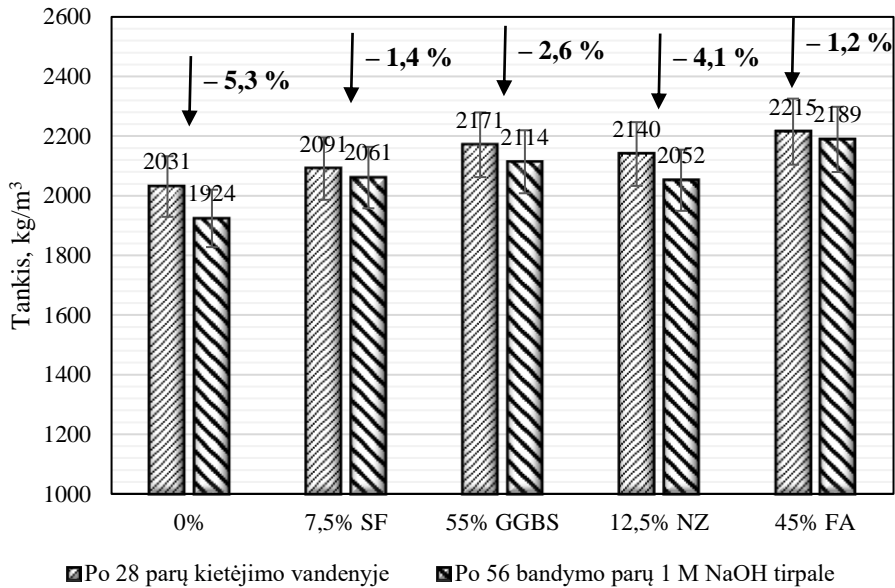
Fig. 3.41. Relationship between the expansion of concrete specimens conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 14 and 56 days and amorphous SiO₂ content in mineral admixtures

3.5.2. Šarminės korozijos poveikis betono fizikinėms savybėms

Po 56 bandymo parų plėtros tyrimų, išlaikant prizmes 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, atlikti bandinių, kurių sudėtyse yra ribinis mineralinių priedų kiekis, tankio tyrimai. Šie lyginamieji betono tankio tyrimai buvo atlikti siekiant nustatyti šarminės korozijos poveikį betono tankiui.

3.42 paveiksle pateikiami tankio lyginamieji tyrimų rezultatai. Nustatyta, kad daugiausia šarminė aplinka paveikė kontrolinį bandinį, kurio tankio reikšmė nuo 2031 kg/m³ mažėjo iki 1924 kg/m³ ir tai sudaro 5,27 % pokytį. Betono sudėtį modifikavus 12,5 % gamtiniu ceolitu, bandinių tankio reikšmė po plėtros tyrimų sumažėja 4,11 %. Cementą pakeitus 55 % aukštakrosnių šlaku, tankio reikšmė sumažėjo nuo 2171 kg/m³ iki 2114 kg/m³, o šis pokytis yra 4,11 %. Panaudojus

silicio dioksido mikrodulkių mineralinį priedą, tankio reikšmė sumažėjo mažiau. Po 28 kietėjimo parų tankis buvo lygus 2091 kg/m^3 , o po plėtros tyrimų tankio reikšmė sumažėjo 1,43 % ir lygi 2061 kg/m^3 . Nustatyta, kad mažiausiai šarminės korozijos aplinka darė įtaką betono tankiams su lakiųjų pelenų priedu, nes tankio reikšmės pokytis yra tik 1,17 % – nuo 2215 kg/m^3 iki 2189 kg/m^3 . Betono bandinių tūris kito mažiausiai, nes gauta mažiausia betono plėtros reikšmė.



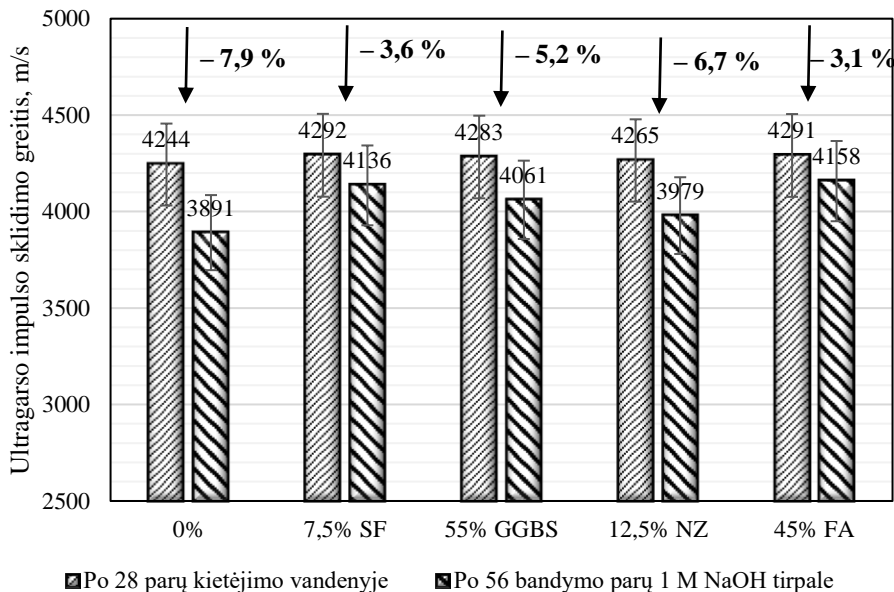
3.42 pav. Betono tankio pokytis po 56 parų plėtros tyrimų, išlaikant bandinius 80°C temperatūros 1 M NaOH tirpale

Fig. 3.42. Changes of density in specimens conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days

Nustatytas ultragarso impulso sklaidimo greičio pokytis po plėtros tyrimų pateikiamas 3.43 paveiksle. Didžiausias pokytis nustatytas kontrolinių bandinių be mineralinių priedų. Jų UIG reikšmė sumažėjo nuo 4244 m/s iki 3891 m/s , o šis pokytis yra 8,32 %. Betono sudėtį modifikavus gamtinio ceolito priedu, ultragarso impulso greičio reikšmė sumažėjo 6,71 % nuo 4265 m/s iki 3979 m/s . Cementą pakeitus 55 % aukštakrosnių šlaku, UIG reikšmė nuo 4283 m/s sumažėjo iki 4061 m/s – šis pokytis lygus 5,18 %. Betoną modifikavus 7,5 % silicio dioksido mikrodulkėmis nustatyta, kad ultragarso impulso sklaidimo greičio reikšmė sumažėjo 3,63 %.

Atlikus lyginamuosius tyrimus nustatyta, kad mažiausias UIG pokytis yra panaudojus 45 % lakiųjų pelenų. UIG reikšmei sumažėjus nuo 4291 m/s iki 4158 m/s , skirtumas sudaro 3,1 %. Taip yra todėl, kad bandiniuose susidarė

mažiausi betono tūrio pokyčiai, dėl to mikrotrūkių kiekis ir mastas yra mažiausias. Atsirandant mikrotrūkiams betono struktūroje, UIG reikšmės mažėja, nes didėja signalo sklaidimo laikas, apeinant mikrotrūkius.



3.43 pav. Betono bandinių ultragarso impulso sklaidimo greičio pokytis po 56 parų plėtros tyrimų, išlaikant bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale

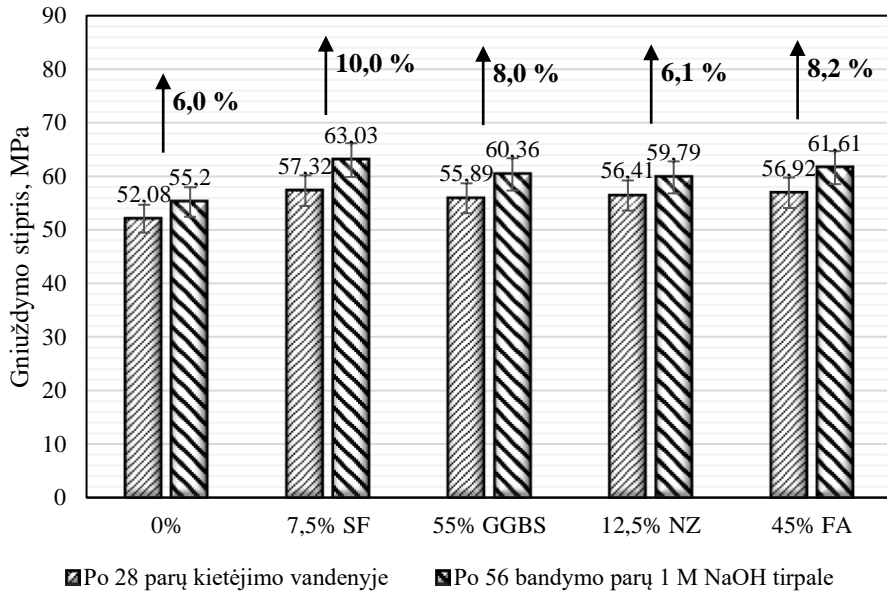
Fig. 3.43. Changes of ultrasonic pulse velocity in specimens conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days

3.5.3. Šarminės korozijos poveikis betono mechaninėms savybėms

Po 56 bandymo parų plėtros tyrimų, išlaikant prizmes 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, atlikti bandinių, kurių sudėtyse yra ribinis mineralinių priedų kiekis, mechaninių savybių tyrimai.

Bandinius 56 paras išlaikius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, atlikti jų gniuždymo stiprio tyrimai. Tyrimų rezultatai pateikiami 3.44 paveiksle. Betono gniuždymo stiprio reikšmės padidėjo po šarminės korozijos poveikio. Daugiausia gniuždymo stiprio reikšmė padidėjo pakeitus cementą 7,5 % silicio dioksido mikrodulkėmis – nuo 57,32 MPa iki 63,03 MPa, ir tai sudaro 10 %. Pakeitus cementą 45 % lakiaisiais pelenais, gniuždymo stiprio reikšmė padidėjo 8,2 % nuo 56,92 MPa iki 61,61 MPa. Betono su 55 % aukštakrosnių šlaku gniuždymo stiprio reikšmė padidėjo 8 %. Mažiausias 6 % gniuždymo stiprio reikšmės pokytis nustatytas kontroliniams bandiniams. Kontrolinių bandinių gniuždymo stiprio

reikšmė padidėjo nuo 52,08 MPa iki 55,2 MPa. Betono su gamtinio ceolito priedu gniuždymo stiprio reikšmė padidėjo nuo 56,41 MPa iki 59,79 MPa, nustatytas pokytis – 6,1 %.



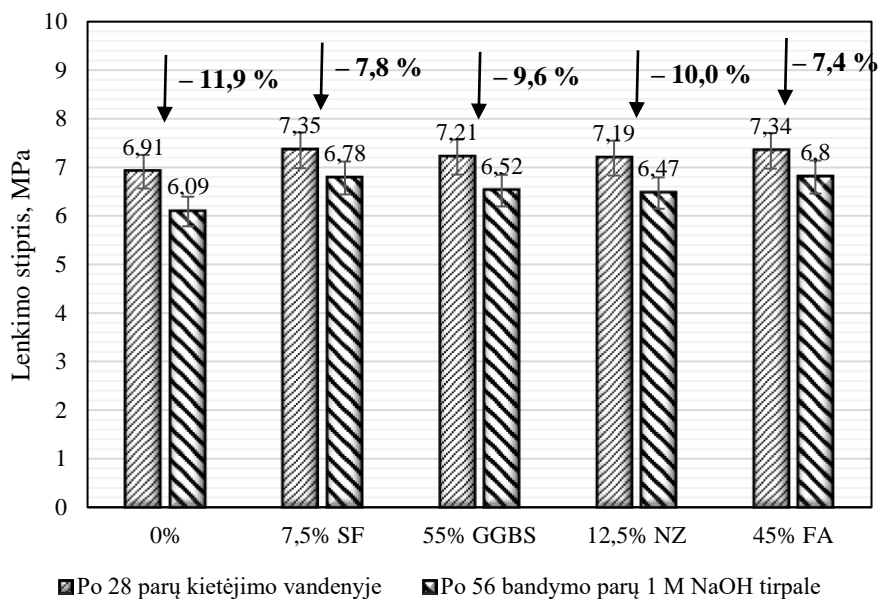
3.44 pav. Betono gniuždymo stiprio pokytis po 56 parų plėtros tyrimų, išlaikant bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale

Fig. 3.44. Changes of compressive strength in specimens conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days

Lenkimo stiprio reikšmės po 56 parų plėtros tyrimų šarminėje aplinkoje pateikiamos 3.45 paveiksle. Šarminės aplinkos sukelta plėtra daro įtaką betono lenkimo stiprio reikšmėms, kurios visų sudėčių bandiniuose sumažėjo. Labiausiai lenkimo stiprio reikšmės sumažėjo kontroliniams bandiniams ir sudarė 11,9 %. Cementą pakeitus 12,5 % gamtiniu ceolitu, lenkimo stiprio reikšmė sumažėjo nuo 7,19 MPa iki 6,47 MPa ir sudarė 10 % pokytį. Betoną modifikavus 55 % šlaku, lenkimo stiprio reikšmė sumažėjo 9,6 % nuo 7,21 MPa iki 6,52 MPa. Cementą pakeitus 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių priedu, lenkimo stiprio reikšmė nuo 7,35 MPa sumažėjo 7,8 % ir yra 6,78 MPa. Mažiausias 7,4 % pokytis nustatytas betone, kuriame panaudota 45 % lakiųjų pelenų – lenkimo stiprio reikšmė sumažėjo nuo 7,34 MPa iki 6,8 MPa.

Lenkimo stiprio reikšmės sumažėjo, nes betono mikrostruktūroje atsiradę įtrūkiai daro didelę įtaką lenkimui, t. y. lenkiant bandinius suirimas vyksta išilgai mikrotrūkių.

Atlikus fizikinius ir mechaninius betono tyrimus po 56 parų, išlaikant bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, nustatyta, kad mažiausiai neigiamas šarminės aplinkos ir plėtros poveikis padarytas betonui, kuris modifikuotas 45 % lakiųjų pelenų mineraliniu priedu. Dalį cemento keičiant lakiisiais pelenais, nustatyti mažiausi tankio, ultragarso impulso sklaidimo greičio ir lenkimo stiprio reikšmių sumažėjimai. Gniuždymo stiprio reikšmės didžiausias padidėjimas (10 %) nustatytas naudojant 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių kiekį.



3.45 pav. Betono lenkimo stiprio pokytis po 56 parų plėtros tyrimų, išlaikant bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale

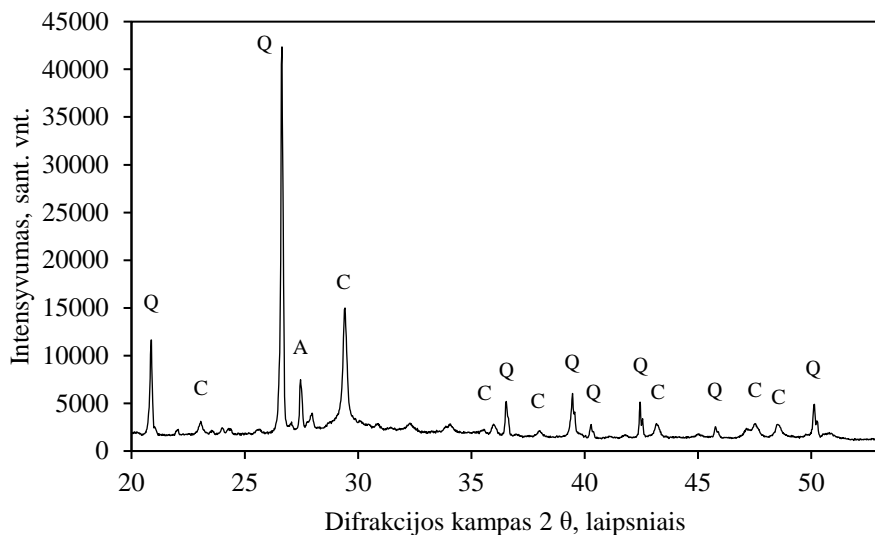
Fig. 3.45. Changes of flexural strength in specimens conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days

Įvertinus fizikinių ir mechaninių savybių bei plėtros tyrimų rezultatus, nustatyta, kad efektyviausias iš tirtų mineralinių priedų yra lakieji pelenai (45 % pakeitus cementą).

3.5.4. Šarminės korozijos poveikis betono mikrostruktūrai

Atlikti rentgeno spinduliuotės difrakcinės analizės tyrimai, siekiant nustatyti lakiųjų pelenų priedo poveikį betono atsparumui šarminei korozijai. Nustatyta kontrolinio bandinio be mineralinių priedų bei betono su ribiniu 45 % ir maksimaliu tirtu 65 % lakiųjų pelenų mineraliniu priedu mineralinė struktūra.

3.46 paveiksle pateikiama betono be mineralinių priedų (kontrolinis bandinys) struktūra. Betoną be mineralinių priedų sudaro kvarcas (SiO_2), kurio bendras kiekis yra 47,3 %, kalcio karbonatas (CaCO_3) – 38 %, anortitas ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) – 9,8 %. Mikroklinas ($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$), albitas ($\text{Na}_{0,986}(\text{Al}_{1,005}\text{Si}_{2,995}\text{O}_8)$), dolomitas ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), ilitas ($(\text{K}, \text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$), klinochloras ($(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) ir kiti, sudarantys likusį kiekį.



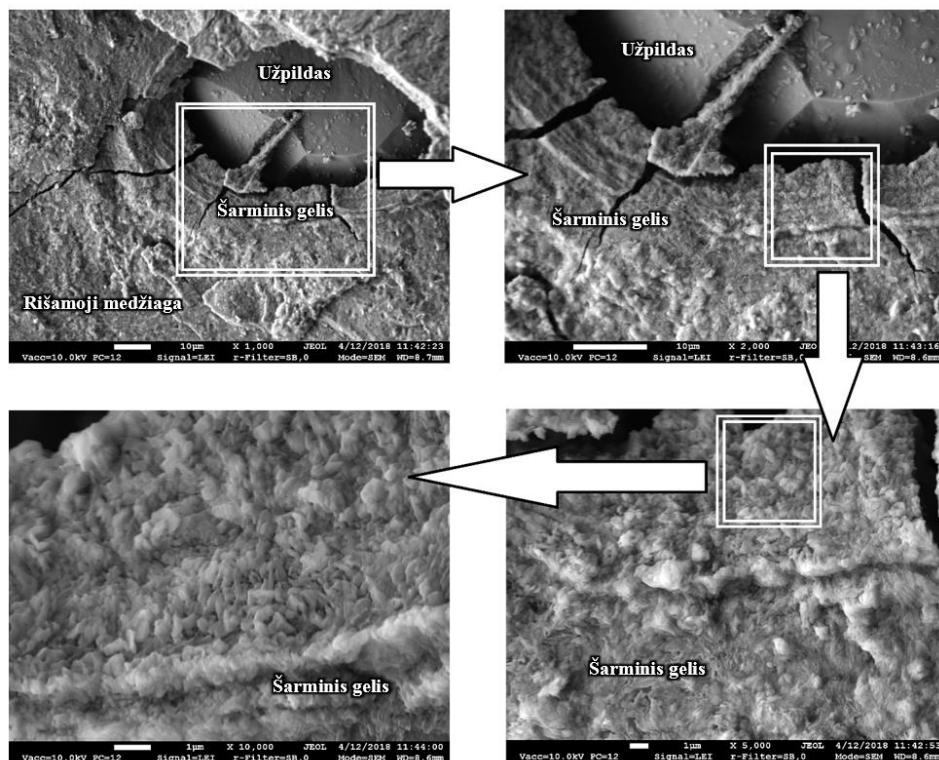
3.46 pav. Betono be mineralinių priedų po 56 parų plėtos tyrimų, išlaikant bandinius 80°C temperatūros 1 M NaOH tirpale, rentgenograma: Q – kvarcas (SiO_2), C – kalcio karbonatas (CaCO_3), A – anortitas ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)

Fig. 3.46. X-ray image of concrete without mineral admixtures conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days: Q – quartz (SiO_2), C – calcium carbonate (CaCO_3), A – anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)

Betono be mineralinių priedų struktūra, ištirta skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu (SEM), pateikta 3.47 paveiksle.

Betone be mineralinių priedų po šarminės korozijos aplinkos poveikio aplink užpildą susidarė šarminio gelio sluoksniai, kurie, absorbavę drėgmę, pradėjo plėstis ir dėl to cementinėje matricoje atsirado įtrūkių. Taip pat tarp užpildo ir šarminės korozijos reakcijos produkto – gelio bei rišamosios medžiagos atsirado tarpas. Padidinus šarminio gelio vaizdą iki 5000 ir 10 000 kartų, matoma šarminio gelio mikrostruktūra, kuri yra labai panaši į struktūrą, pateiktą 1.2 paveiksle. Betono mikrostruktūros pokyčiai, kuriuos sukelia šarminės korozijos procesai, mažina sukietėjusio betono tankį, ultragarso impulso sklaidimo greitį bei gniuždymo ir

lenkimo stiprius, dėl to eksploatacijos metu betono paviršiuje atsiranda įtrūkių, pažeidų, atskiliniųjų.

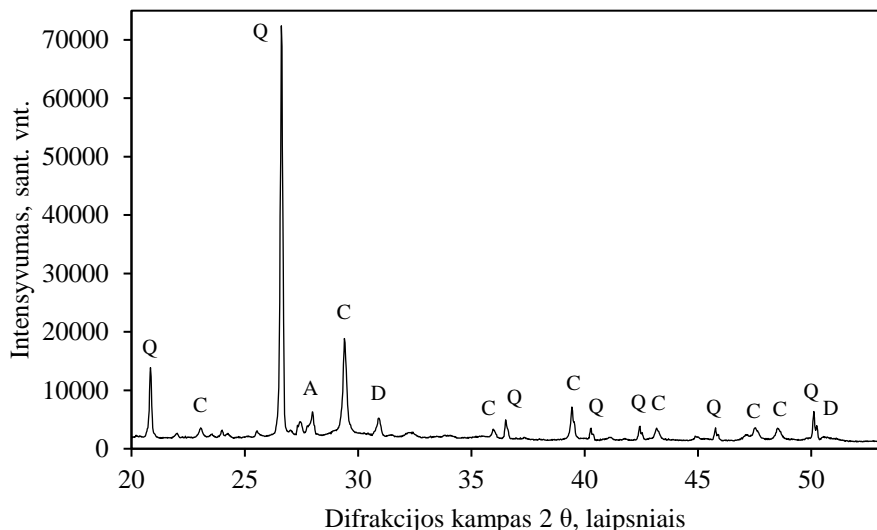


3.47 pav. Betono be mineralinių priedų mikrostruktūra po 56 parų plėtros tyrimų, išlaikant bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale

Fig. 3.47. Microstructure of concrete without mineral admixtures conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days

Betono su ribiniu 45 % lakiųjų pelenų priedo kiekiu po šarminės aplinkos poveikio mineralinė struktūra pateikta 3.48 paveiksle. Rentgenogramos intensyvumas yra kur kas didesnis, lyginant su betono be mineralinių priedų rentgenograma. Dominuojantis elementas, kaip ir betone be mineralinių priedų, yra kvarcas (SiO_2), kurio bendras kiekis bandinyje yra 49,6 %. Kalcio karbonato (CaCO_3) nustatyta 35 %. Taip pat randama anortito ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), kurio kiekis yra 8,4 %, dolomito ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) yra 4 %. Likusį kiekį sudaro šie elementai: albitas ($\text{Na}_{0,986}(\text{Al}_{1,005}\text{Si}_{2,995}\text{O}_8)$), mikroklinas ($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$), ilitas ($(\text{K}, \text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$) ir klinochloras ($(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})_6(\text{S}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$).

Lakiaisiais pelenais modifikuotame betone susidaro 2,3 % daugiau kvarco (SiO_2), 3 % mažiau kalcio karbonato (CaCO_3), 1,4 % mažiau anortito ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), 4 % dolomito ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).



3.48 pav. Betono, modifikuoto 45 % lakiųjų pelenų, rentgenograma po 56 parų plėtros tyrimų, išlaikant bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale:

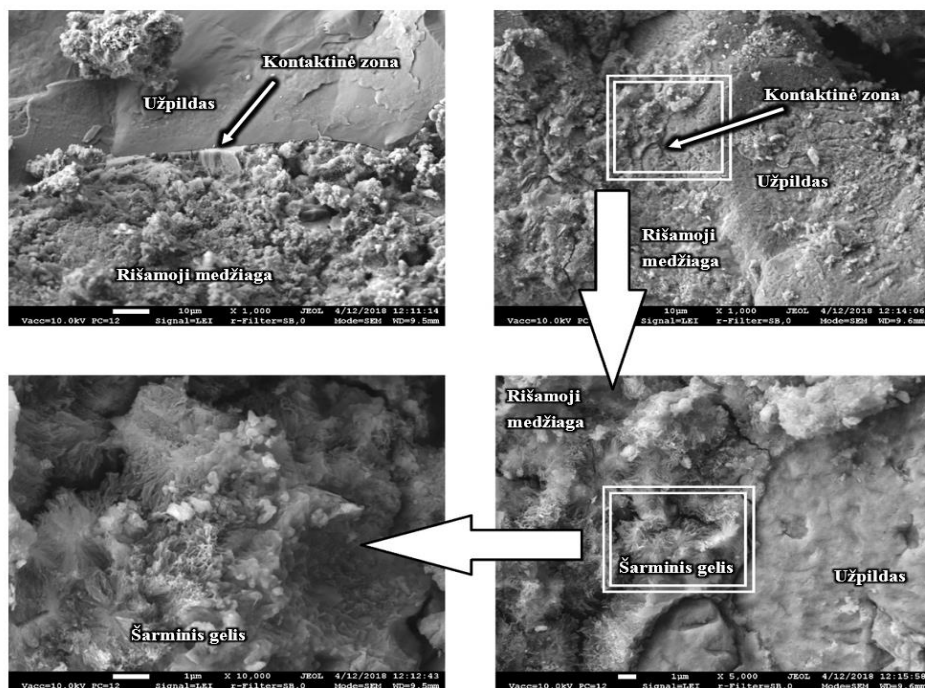
Q – kvarcas (SiO_2), C – kalcio karbonatas (CaCO_3), A – anortitas ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$),
D – dolomitas ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)

Fig. 3.48. X-ray image of concrete modified with 45 % of fly ash conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days: Q – quartz (SiO_2), C – calcium carbonate (CaCO_3), A – anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), D – dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)

Betono, modifikuoto 45 % lakiųjų pelenų priedu, mikrostruktūra po 56 parų plėtros tyrimų, išlaikius bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, pateikta 3.49 paveiksle.

Po šarminės aplinkos poveikio betono su lakiųjų pelenų priedu mikrostruktūroje sąlyčio zona tarp užpildo ir rišamosios medžiagos yra daug tvirtesnė, tarpų nedaug, o kai kur jų iš viso nėra, lyginant su betonu be mineralinių priedų. Cementinės matricos įtrūkių yra, tačiau jie nedideli. Šarminio gelio sankaupos aptinkamos, tačiau, lyginant su betonu be mineralinių priedų, gelio struktūra nėra tokia masyvi ir paplitimo mastas kur kas mažesnis, nėra aiškiai matomų susidariusių šarminės korozijos produktų sluoksnių.

Atlikti rentgenografiniai tyrimai su betono bandiniais, kurių sudėtis modifikuota maksimaliu tirtu 65 % pelenų kiekiu, siekiant nustatyti maksimalų lakiųjų pelenų poveikį betonui. Rentgeno spinduliuotės difrakcinės analizės tyrimų rezultatai pateikiami 3.50 paveiksle.



3.49 pav. Betono bandinių, modifikuotų 45 % lakiųjų pelenų, mikrostruktūra po 56 parų plėtros tyrimų, išlaikant bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale

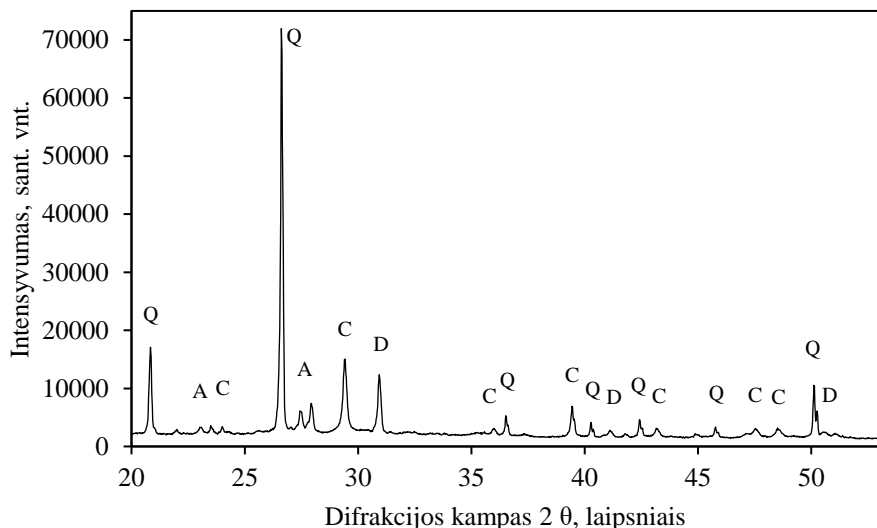
Fig. 3.49. Microstructure of concrete modified with 45 % fly ash mineral admixtures conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days

Betono su 65 % lakiųjų pelenų priedu rentgenograma po 56 parų plėtros tyrimų, išlaikant bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, yra labai panaši į betono, modifikuoto 45 % lakiųjų pelenų, rentgenogramą. Intensyvumas ir elementinė sudėtis yra vienoda, tačiau skiriasi elementų kiekybinis pasiskirstymas: kvarcas (SiO_2) – 50,4 %, kalcio karbonatas (CaCO_3) – 25,1 %, anortitas ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) – 13,5 %, dolomitas ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) – 10,2 %. Likusį kiekį sudaro šie elementai: albitas ($\text{Na}_{0,986}(\text{Al}_{1,005}\text{Si}_{2,995}\text{O}_8)$), mikroklinas ($\text{K}(\text{AlSi}_3)\text{O}_8$), ilitas ($((\text{K}, \text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2)$) ir klinochloras ($(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})_6(\text{S}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$).

Lyginant 65 % lakiųjų pelenų modifikuotų betonų ir betonų be mineralinių priedų mineralines struktūras, nustatyti šie skirtumai: betone su lakiųjų pelenų priedu yra 3,1 % daugiau kvarco (SiO_2), 12,9 % mažiau kalcito (CaCO_3), 3,7 % daugiau anortito ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), randamas 10,2 % dolomito ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) kiekis, kurio betone be mineralinių priedų yra tik mažas kiekis.

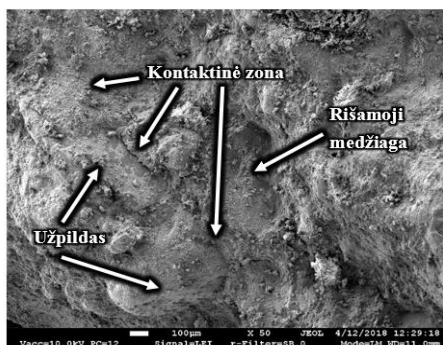
Maksimaliu lakiųjų pelenų kiekiu modifikuotų betono bandinių struktūra po 56 parų plėtros tyrimų, išlaikant bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale,

nustatyta skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu (SEM), pateikta 3.51 paveiksle.



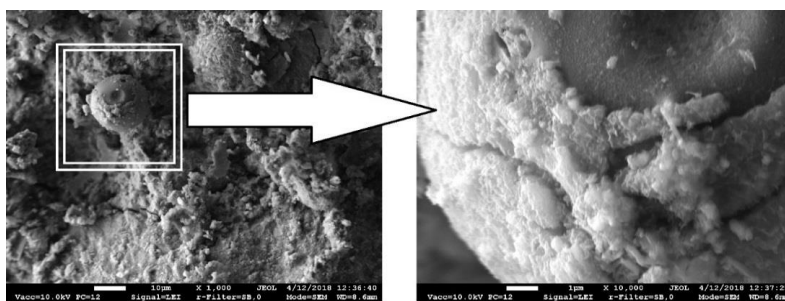
3.50 pav. Betono, modifikuoto 65 % lakiųjų pelenų, rentgenograma po 56 parų plėtros tyrimų, išlaikant bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale: Q – kvarcas (SiO_2), C – kalcio karbonatas (CaCO_3), A – anortitas ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), D – dolomitas ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)

Fig. 3.50. X-ray image of concrete modified with 65 % of fly ash conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days: Q – quartz (SiO_2), C – calcium carbonate (CaCO_3), A – anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), D – dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)



3.51 pav. Betono bandinių, modifikuotų 65 % lakiųjų pelenų, mikrostruktūra po 56 parų plėtros tyrimų, išlaikant bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale
Fig. 3.51. Microstructure of concrete modified with 65 % fly ash mineral admixtures conditioned in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days

Betono, modifikuoto 65 % lakiųjų pelenų, mikrostruktūroje matoma, kad sąlyčio zona tarp užpildo ir rišamosios medžiagos visur yra labai stipri, be jokių tarpų ir skilimo požymių, neužfiksuota jokių cementinės matricos įtrūkių ar kitų pažeidimų, kurie būdingi paveiktiems šarminės korozijos betono paviršiams. Betono mikrostruktūroje dėl išskirtinai sferinės formos užfiksuotos lakiųjų pelenų dalelės sukietėjusiam betone, kurios pateiktos 3.52 paveiksle. Matoma, kad lakiųjų pelenų dalelės aplipusios SiO_2 ir šarmų reakcijos produktu. Lakieji pelenai, savo sudėtyje turėdami 49,8 % SiO_2 , kur kas greičiau nei užterštuose užpilduose esantis aktyvusis silicio dioksidas, reaguoja su NaOH ir KOH šarmais, esančiais cimente. Tokiu būdu sumažinamas šarminio gelio formavimasis užpildų ir rišamosios medžiagos sąlyčio zonoje, dėl to betonai tampa atsparūs šarminiai korozijai.



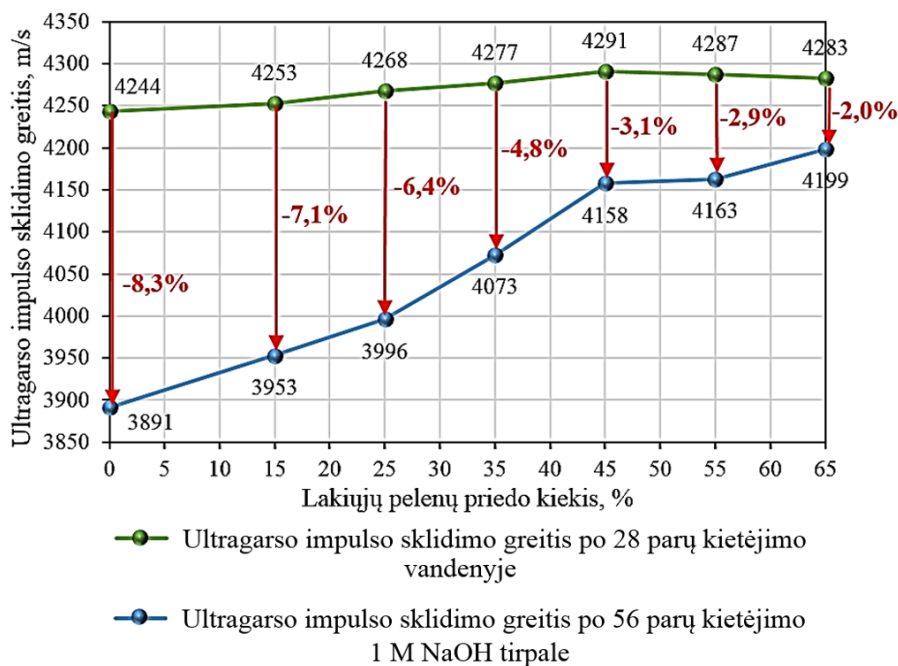
3.52 pav. Lakiųjų pelenų dalelės sukietėjusiam betone po 56 parų plėtros tyrimų, išlaikant bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale

Fig. 3.52. Particles of fly ash in hardened cement paste after expansion tests of conditioning in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days

Stambusis užpildas, paveiktas šarminės aplinkos, sukelia gerokai didesnes plėtras, t. y. sukeliami didesni vidiniai betono įtempiai negu smulkiojo užpildo. Nustatyta, kad lakiųjų pelenų dalelės dėl savo smulkumo, artimo cementui, formuojantis šarminiam geliui, sukelia labai nedideles vietines plėtras. Dėl santykinai nedidelių plėtrų vidiniai įtempiai neviršija betono stiprumo ir tai neleidžia susidaryti betono pažeidimams.

3.5.5. Šarminės korozijos sukeltos betono plėtros grafinė priklausomybė

Betono bandinių su lakiųjų pelenų priedu, 28 paras kietėjusių vandenyje ir 56-ias plėtros bandymo paras laikomų 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, ultragarso impulso sklaidimo greičio pokyčio priklausomybė nuo lakiųjų pelenų priedo kiekio pateikiama 3.53 paveiksle.

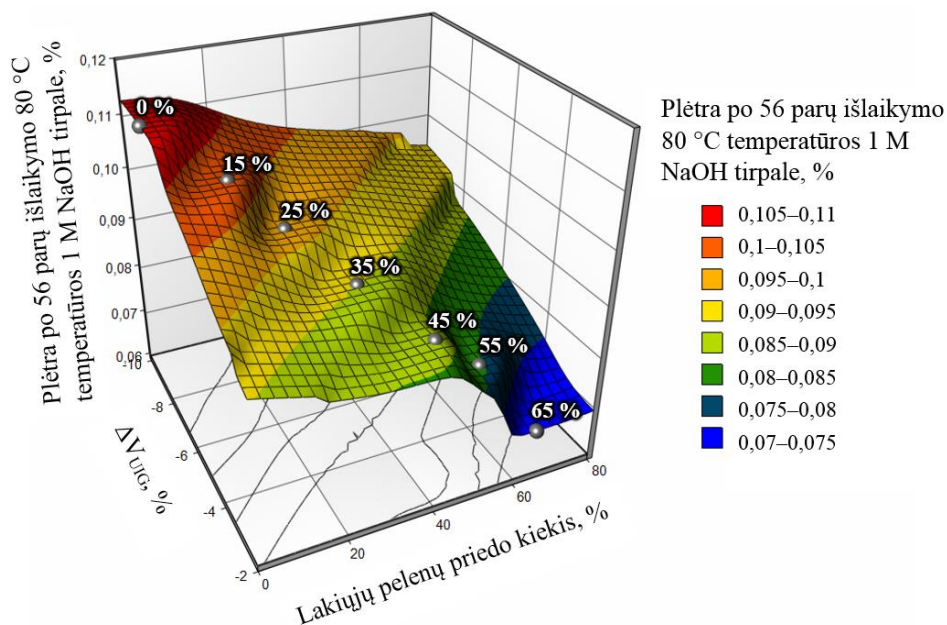


3.53 pav. Betono ultragarso impulso sklaidimo greičio pokyčio priklausomybė nuo lakiųjų pelenų priedo kiekio

Fig. 3.53. Relationship between the change of ultrasonic pulse velocity and fly ash content

Betono po šarminės korozijos tyrimų UIG reikšmės sumažėjo, tačiau pokytis yra skirtingas, atsižvelgiant į lakiųjų pelenų priedo kiekį. Betono be mineralinių priedų pokytis yra 8,3 %, o cementą pakeitus 45 % lakiųjų pelenų priedu, pokytis sumažėjo iki 3,1 %. Panaudojus maksimalų 65 % priedo kiekį betone, pokytis yra tik 2 %. Lakiisiais pelenais modifikuoto betono, 28 paras kietėjusio vandenyje ir 56 šarminės korozijos tyrimų paras išlaikyto 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, ultragarso impulso sklaidimo greičio pokytis tiesiogiai priklauso nuo mineralinio priedo kiekio betono mišinyje. Didinant priedo kiekį, mažėja UIG pokytis.

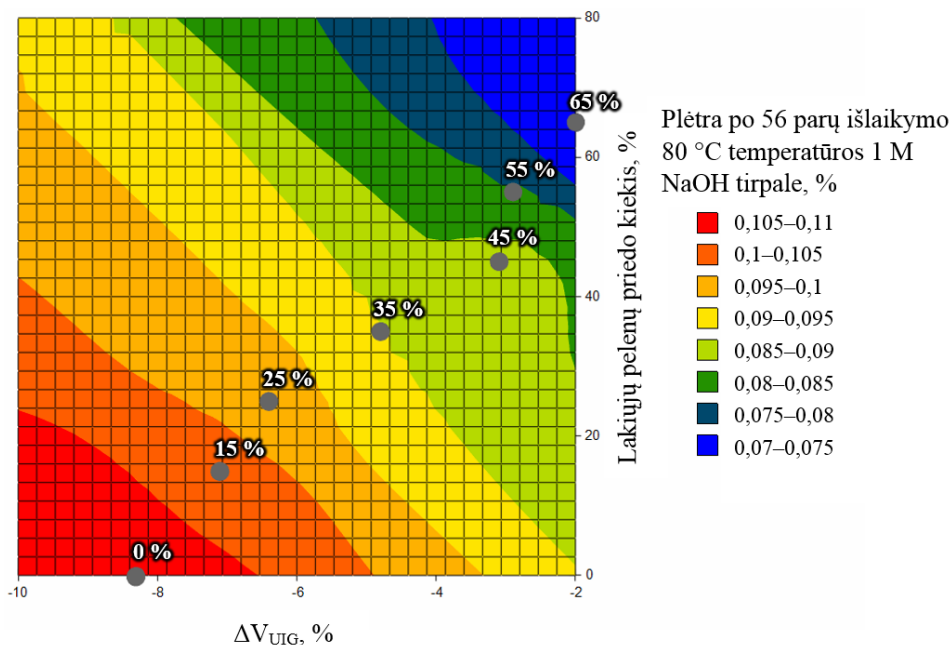
Siekiant įvertinti lakiųjų pelenų mineralinio priedo kiekio poveikį betono bandinių plėtrai, remiantis prieš tai atliktų eksperimentinių tyrimų duomenimis, nustatytas ryšys (3.54 paveikslas) tarp lakiųjų pelenų priedo kiekio, betono ultragarso impulso sklaidimo greičio pokyčio po 28 parų kietėjimo vandenyje ir po šarminės korozijos bandymų (ΔV_{UIG}) bei plėtros, 56 paras išlaikius bandinius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale.



3.54 pav. Betono, išlaikyto 56 paras 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, plėtros priklausomybės nuo lakiųjų pelenų priedo kiekio ir UIG pokyčio

Fig. 3.54. Relationships between the expansion of concrete after conditioning in 1 N NaOH solution of 80 °C for 56 days, the amount of fly ash and the change in ultrasonic pulse velocity

Betono bandinių, išlaikytų 56 parų 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, plėtros priklausomybės nuo lakiųjų pelenų priedo kiekio ir UIG pokyčio grafinės išraiškos projekcija į x ir y ašis (dvimatė priklausomybės išraiška) pateikiama 3.55 paveiksle. Pagal šią projekciją galime nustatyti betono bandinių plėtrą pagal lakiųjų pelenų priedo kiekį betono mišinyje ir suketėjusių bandinių ultragarso impulso sklaidimo greičio pokytį po 28 parų kietėjimo vandenyje ir 56 parų plėtros tyrimų 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale. Pavyzdžiui, betono mišinyje 60 % cemento pakeitus lakiųjų pelenų priedu ir UIG pokyčiui esant 5 %, galima prognozuoti, kad bandinių, 56 paras išlaikytų 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, plėtra yra apie 0,08–0,085 %. Esant tokiai plėtros reikšmei, nustatyta, kad betono plėtra neviršija leidžiamosios 0,1 % ribos, 56 paras išlaikius 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, ir betonas yra atsparus šarminei korozijai.



3.55 pav. Betono bandinių, 56 paras išlaikytų 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale, plėtros priklausomybė nuo lakiųjų pelenų priedo kiekio ir UIG pokyčio

Fig. 3.55. Relationship between the expansion of concrete specimens after conditioning in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days, the amount of fly ash and the change in ultrasonic pulse velocity

3.5.6. Rekomendacijos betono šarminei korozijai mažinti

Siekiant tiksliai įvertinti, ar suprojektuotas betono mišinys atitinka ilgaamžiškumo reikalavimus, eksploatuojant konstrukcijas šarminei korozijai palankioje aplinkoje, būtina atlikti šarminės korozijos tyrimus. Šiam tikslui reikia pasirinkti tyrimų metodiką, kuri tiksliai įvertintų betono atsparumą šarminei korozijai.

Ruošiant betono mišinį su reaktyviosiomis dalelėmis užterštais užpildais, rekomenduotina atlikti prailgintus šarminės korozijos tyrimus.

Rekomenduotina šarminės korozijos tyrimus atlikti pagal standartinę „RILEM AAR-2“ tyrimų metodiką, bandinius išlaikant 56 paras 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale.

Betono bandinių plėtras nustatyti po 14 ir 56 bandymo parų. Plėtros negali viršyti 0,054 % ir 0,1 % kritinių ribų.

Mineraliniai priedai, turintys SiO₂, yra priemonė, padedanti sumažinti šarminės korozijos sukeltą plėtrą. Naudojant cementą be mineralinių priedų ir reaktyviosiomis dalelėmis užterštus užpildus, rekomenduojami ribiniai mineralinių

priedų kiekiai betone pakeičiantys cementą ir sumažinantys šarminės korozijos sukiamas plėtras, yra šie: 55 % aukštakrosnių šlakas, 45 % lakieji pelenai, 12,5 % gamtinis ceolitas ir 7,5 % silicio dioksido mikrodulkės.

Projektuojant padidinto atsparumo šarminei korozijai betonų sudėtis, panaudojant reaktyviosiomis dalelėmis užterštus užpildus, rekomenduojama įvertinti ne tik mineralinių priedų kieki, bet ir ultragarso impulso sklaidimo greičio pokytį. Šis pokytis tarp betono bandinių, kietintų 28 paras vandenyje ir išlaikytų 56 paras 1 M NaOH tirpale, atspindi šarminės korozijos reakcijos produkto daromą žalą. Plečiantis šarminiam geliui, susidarę vidiniai įtempiai sukelia mikrostruktūros pokyčius: cementinėje matricoje atsiranda mikroįtrūkių, tarp užpildo ir rišamosios medžiagos atsiranda tarpų, suskyla užpildo dalelės. Šie mikrostruktūros pažeidimai sudaro kliūtį ultragarso bangai skliti medžiagoje.

Projektuojant padidinto atsparumo šarminei korozijai betono mišinio sudėtį, būtina kompleksiskai įvertinti visus šiuos aspektus: betono bandinių plėtras, mineralinių priedų kiekius, ultragarso impulso sklaidimo greičio pokyčius. Taip pat būtina atsižvelgti į užpildų užterštumą reaktyviosiomis dalelėmis ir naudojamo cemento sudėtį.

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

1. Išanalizavus mineralinių priedų sudėtį rentgeno difrakcinės analizės metodu, nustatyta, kad lakiuosiuose pelenuose kvarco (SiO_2) yra 55 %, aukštakrosnių šlake – 22 %. Lakiuosiuose pelenuose yra 29 % mulito ($\text{Al}_{2,34} \text{Si}_{0,66}$). Dominuojantis gamtinio ceolito elementas yra heulanditas ($\text{Na}_{2,6} \text{Mg}_{0,36} \text{Al}_{3,32} \text{Si}_{14,68} \text{O}_{36} (\text{H}_2\text{O})_{10,32}$), kurio bendras kiekis sudaro 92,2 %. Visi šie mineralai savo sudėtyje turi silicio dioksido, kuris mažina žalingą šarminės korozijos poveikį betonui, turinčiam reaktyviosiomis dalelėmis užterštų užpildų.
2. Atlikus betono šarminės korozijos plėtros tyrimus su skirtingais cementais ir vienodo reaktyvumo užpildais, nustatyta, kad didžiausią teigiamą poveikį betono plėtrai daro cementas CEM II A-V 52,5N, turintis pelenų priedo. Jį naudojant, bandinių, išlaikytų 56 paras 80 °C 1 M NaOH tirpale, plėtra sudaro 0,105 %. Didžiausia betono plėtros reikšmė, naudojant CEM I 42,5 R cementą be mineralinių priedų, yra 0,113 %. Visų betono mišinių su skirtingais cementais plėtra viršijo ribinę 0,1 % ribą. Naudojant mažasarmių ir sudėtinių cementus, turinčius mineralinių priedų, mažinama betono bandinių plėtra, tačiau nepakankamai dėl santykinai mažo mineralinių priedų kiekio.
3. Nustatyta, kad mineraliniai priedai didina sukietėjusio betono tankį, ultragarso impulso sklaidimo greitį, gniuždymo ir lenkimo stiprius, bei

mažina vandens įgertį. Fizikinių ir mechaninių savybių reikšmės mažėja perdozavus mineralinių priedų kiekį, nes sumažintas cemento kiekis neužtikrina stipraus ryšio tarp užpildo ir cementinės matricos.

4. Mažiausios betonų vandens įgertys ir didžiausi tankiai, ultragarso impulso sklidimo greičiai bei gniuždymo ir lenkimo stipriai nustatyti cementą pakeitus 10 % silicio dioksido mikrodulkių, 10 % gamtinio ceolito, 45 % aukštakrosnių šlako ir 35 % lakiųjų pelenų priedu.
5. Nustatyti ribiniai mineralinių priedų kiekiai betone, kai plėtra neviršija leidžiamųjų kritinių ribų po 14 (0,054 %) ir 56 (0,1 %) bandymo parų: 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių, 55 % aukštakrosnių šlako, 12,5 % gamtinio ceolito ir 45 % lakiųjų pelenų. Mažiausia betono plėtra (0,069 %) po 56 bandymo parų nustatyta bandiniams, kurie modifikuoti 65 % lakiųjų pelenų priedu, nes betono mišinyje yra didžiausias SiO_2 kiekis.
6. Mažiausiai neigiamas šarminės aplinkos poveikis po 56 bandymo parų nustatytas betonui, kuris modifikuotas lakiųjų pelenų mineraliniu priedu. Kompleksiškai įvertinus modifikuoto betono tankį, vandens įgertį, ultragarso impulso sklidimo greitį, gniuždymo ir lenkimo stiprius bei plėtros tyrimų rezultatus, nustatyta, kad pats efektyviausias iš tirtų mineralinių priedų yra lakieji pelenai.
7. Atlikus betono, neturinčio mineralinių priedų ir modifikuoto lakiaisiais pelenais, rentgenostruktūrinius tyrimus, nustatyta, kad, sudėtį modifikavus 45 % ir 65 % mineraliniu priedu, daugėja kvarco (SiO_2) ir mažėja kalcito (CaCO_3), lyginant su kontroliniu bandiniu. SEM tyrimais nustatyta, kad šarminė korozija sukelia dideles betono, neturinčio mineralinių priedų, pažaidas: vyksta užpildo dalelių plėtra, cementinė matrica atsiskiria nuo užpildo, atsiranda didelių mikrotrūkių, aplink užpildo daleles susisluoksniuoja šarminis gelis. Betone su lakiųjų pelenų priedu didelių mikrotrūkių nenustatyta, rišamosios medžiagos ir užpildų sukibimas stiprus, šarminio gelio sancaupų yra, tačiau jų masyvumas gerokai mažesnis.

Bendrosios išvados

1. Užpildų reaktyvumo tyrimais nustatyta, kad užpildai yra užteršti reaktyviosiomis dalelėmis, kurių vidutinis kiekis smėlyje sudaro 3,44 %, o žvirgžde – 3,24 %. Naudojant tokius užpildus betone, būtina taikyti šarminės korozijos prevencines priemones.

2. Sudėtiniai portlandcemenčiai (CEM II/A-S 42,5 N ir CEM II/A-V 52,5 N), kurių sudėtyje yra iki 20 % mineralinių priedų, neužtikrina betono atsparumo šarminei korozijai, nes po 56 bandymo parų 80 °C temperatūros 1 M NaOH tirpale betono plėtra su skirtingais cementais viršija kritinę leidžiamąją 0,1 % ribą: šlakinio portlandcemenčio plėtros vertė yra 0,108 %, betono su pelenų portlandcemenčiu – 0,105 %. Kontrolinių bandinių su cementu be mineralinių priedų betono plėtros reikšmė – 0,113 %.

3. Atlikus betonų vandens įgerties, tankio, ultragarso impulso sklaidimo greičio bei gniuždymo ir lenkimo stiprių po 28 parų kietėjimo vandenyje tyrimus (naudojant superplastiklį vienodam betono mišinių slankumui pasiekti) kompleksškai nustatyti ir įvertinti ribiniai mineralinių priedų kiekiai betone: 10 % silicio dioksido mikrodulkių, 10 % gamtinio ceolito, 45 % aukštakrosnių šlako ir 35 % lakiųjų pelenų priedo. Didinant mineralinių priedų kiekius betone tankio, ultragarso impulso sklaidimo greičio, gniuždymo arba lenkimo stiprio reikšmės mažėja. Tai paaiškinama mineralinių priedų perdozavimu – neužtikrinamas stiprus ryšys tarp užpildo ir cementinės matricos.

4. Betono šarminės korozijos tyrimais nustatyti ribiniai mineralinių priedų kiekiai (betono mišinyje keičiantys dalį rišamosios medžiagos), kurie riboja betono plėtrą iki 0,054 % ir 0,1 % po 14 ir 56 bandymo parų: 45 % lakiųjų pelenų, 55 % aukštakrosnių šlako, 7,5 % silicio dioksido mikrodulkių, 12,5 % gamtinio ceolito.

5. Mineraliniuose prieduose esantis aktyvusis SiO_2 suriša cemente esančius natrio ir kalio šarmus, prieš jiems sureaguojant su betono užpilduose esančiu SiO_2 . Skenuojančiosios elektroninės mikroskopijos tyrimų rezultatai rodo, kad betono mišinyje aktyvieji mineraliniai priedai greičiau nei užteršti užpildai reaguoja su NaOH ir KOH šarmais, esančiais cemente. Tokiu būdu mažinamas šarminio gelio kiekis užpildų ir rišamosios medžiagos sąlyčio zonoje.

6. Nustatyta priklausomybė tarp lakiųjų pelenų mineralinio priedo kiekio betono mišinyje, betono ultragarso impulso sklidimo greičio pokyčio ir plėtros, nustatančios šarminės korozijos poveikį betonui. Ultragarso impulso sklidimo greitis betone kinta dėl plėtros sukeltų mikroįtrūkių, kurie sudaro kliūtį ultragarso bangai sklisti medžiagoje. Modifikuojant betoną mineraliniu priedu nuo 0 % iki 65 %, ultragarso impulso sklidimo greičio pokytis kinta nuo 8,3 % iki 2 %.

Literatūra ir šaltiniai

AASHTO TP 110–14. 2016. Potential Alkali Reactivity of Aggregates and Effectiveness of ASR Mitigation Measures (Minature Concrete Prism Test, MCPT), AASHTO, Washington, D.C.

ACI Committee 201.1992. Guide to durable concrete, American Concrete Institute, Report of ACI Committee 201.

ACI221. 1998. State-of-the-art report on Alkali-aggregate reactivity. ACI Committee 221 Report, ACI 221.1R-98, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

Almusallam, T. H. 1995. Effect of fly ash on the mechanical properties of concrete, in *Proceedings of the 4th Saudi Engineering Conference*. Vol. 2. pp. 187–192.

Alvarez, M. 2006. Marine durability characteristics of rice husk ashmodified reinforced concrete, in *Proceedings of the 4th LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCET '06)*, Breaking Frontiers and Barriers in Engineering: Education, Research and Practice. Mayaguez, Puerto Rico.

Andic–Cakır, Ö. 2007. Investigation of test methods on Alkali-aggregate reaction, PhD thesis, School of Natural and Applied Sciences, Ege University, Izmir.

ASTM C227-10. 2010. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C289-07. 2016. Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method).

Ayub T.; Shafiq N.; Khan S. U. 2013. Durability of Concrete with Different Mineral Admixtures: A Review, *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*. Vol.7, No:8, pp. 601–612.

Ayub, T.; Khan, S. U.; Memon, F. A. 2014. Mechanical Characteristics of Hardened Concrete with Different Mineral Admixtures: A Review, *The Scientific World Journal*. Vol. 2014. Article ID 875082, p. 15.

Bagel, L. 1998. Strength and pore structure of ternary blended cement mortars containing blast furnace slag and silica fume, *Cement and Concrete Research*. Vol. 28 (7). pp. 1011–1022.

Ballard, Z. J.; Caires, W. S.; Peters, S. R. 2008. Alternate Mitigation Materials for Alkali-Silica Reaction (ASR) in Concrete, Colorado Department of Transportation DTD Applied Research and Innovation Branch. Report No. CDOT-2008-10.

Barnard, D. P. 1991. Alkali aggregate reaction – minimising the risk of damage to concrete – guidance on model specification clauses. Report No. TR3, Cement and Concrete Association of New Zealand, Poriva, New Zealand.

Bektaş, F.; Turanlı, L.; Monteiro, P. J. M. 2005. Use of perlite powder to suppress the Alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 35(10), 2014–2017.

Bektas, F.; Wang, K.; Ceylan, H. 2008. Effect of Portland cement fineness on ASTM C 1260 expansion, SN 2963, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, p. 30.

Berra, M.; Mangialardi, T.; Paolini A. E. 1998. Testing natural sands for the alkali reactivity with the ASTM C 1260 mortar bar expansion method, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, Vol. 106, pp. 237–241.

Bérubé, M. A.; Fournier, B.; Dupont, N.; Mongeau, P.; Frenette, J. 1992. A Simple Autoclave Mortar Bar Method for Assessing Potential Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete, *9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, London, England. pp. 81–91.

Berube, M. A.; Fournier, B.; Mongeau, P.; Dupont, N.; Quellet, C.; Frenette, J. 1992. Effectiveness of the accelerated mortar bar method, ASTM C-9 proposal P214 or NBRI, for assessing potential AAR in Quebec, *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR)*, London, England. pp. 92–101.

Bianchi, G. Q.; Garcia, A. L.; Geus, J. W.; Brouwers, H. J. H. 2013. Characterization of morphology and texture of several amorphous nano-silica particles used in concrete, *Cement & Concrete Composites*. Vol. 44. pp. 77–92.

Blanks, R. F.; Meissner, H. S. 1946. The expansion test as a measure of Alkali-aggregate reaction, *Journal of the American Concrete Institute*. Vol. 42(4). pp. 517–539.

Bocullo, V.; Grinys, A. 2013. Betono su aktyviaisiais mineraliniais priedais šarminės korozijos tyrimas, *16th Conference for Junior Researchers „Science – Future of Lithuania“*. Vol. 16. pp. 1–8.

Chatterji, S. 2005. Chemistry of Alkali-silica reaction and testing of aggregates, *Cement and Concrete Composites*. Vol. 27(7–8). pp. 788–795.

Clayton, D.; Khazanovich, L.; Salles, L. 2016. Report: Linear Array Ultrasonic Test Results from Alkali-Silica Reaction (ASR) Specimens, *Electrical and Electronics Systems Research Division*. ORNL/TM-2016/159.

Comi, C.; Kirchmayr, B.; Pignatelli, R. 2012. Two-phase damage modeling of concrete affected by Alkali-silica reaction under variable temperature and humidity conditions, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 49. pp. 3367–3380.

Cook, D. J. 1986a. Natural pozzolanas, *Cement Replacement Materials* (Ed. R. N. Swamy), pp. 1–39, Surrey University Press, London.

Crucq P. 2005. Development of a method to measure the mechanical behavior of ASR gels. Part I: Literature Study; Alkali-silica reaction, causes, effects and prevention. Microlab Civil Engineering and Geosciences, 31 p.

DeGrosbois, M.; Fontaine, E. 2000. Performance of the 60°C – accelerated concrete prism test for the evaluation of potential Alkali-reactivity of concrete aggregates, *11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. pp. 277–286.

Diamond, S.; Thaulow, N. 1974. A study of expansion due to Alkali-silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate. *Cement and Concrete Research*, 4(4), 591–607.

Dolar-Mantuani, L. 1983. Handbook of concrete aggregates – a petrographic and technological evaluation, New Jersey: Noyes. ISBN 0815509510.

Duchesne, J. and Bérubé, M. A. 1994. The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: another look at the reaction mechanisms part 2: pore solution chemistry. *Cement and Concrete Research* (24). pp. 221–230.

Duncan, M. A. G.; Swenson, E. G.; Gillott, J. E.; Foran, M. R. 1973. Alkali-aggregate reaction in Nova Scotia I. Summary of a five-year study, *Cement and Concrete Research*, Vol. 3(1). pp. 55–69.

Dunstan, E. R. 1981. The effect of fly ash on concrete Alkali-aggregate reaction, *Cement, Concrete and Aggregates*, 3. pp. 101–104.

Durand, B.; Berard, J.; Soles, J. A. 1987. Comparison of the effectiveness of mineral admixtures to counteract Alkali-aggregate reaction, *Concrete Aggregate Reactions* (Ed. P. E. Grattan-Bellew), New Jersey: Noyes Publications. 30–35.

Farny, J. A.; Kerkhoff, B. 2007. Diagnosis and control of Alkali-aggregate reactions in concrete, Portland Cement Association. PCA R&D Serial No. 2071b. ISBN 0-89312-146-0.

Ferraris, C. F. 1995. Alkali-Silica Reaction and High Performance Concrete, NISTIR 5742. pp. 1–19.

- Ferraris, C.; Garboczi, E.; Stutzman, P.; Winpigler, J.; Clifton, J. 2000. Influence of silica fume on the stresses generated by Alkali-silica reaction. *Cement, Concrete & Aggregates* (22): 73–78.
- Folliard, K. J.; Thomas, M. D. A.; Kurtis, K. E. 2003. *Guidelines for the use of lithium to mitigate or prevent ASR*, Publication no. FHWA-RD-03-047, Turner-Fairbank Highway Research Center, VA, USA. p. 86.
- Folliard, K. J.; Barborak, R.; Drimalas, T.; Du, L.; Garber, S.; Ideker, J. H.; Ley, T.; Williams, S.; Juenger, M.; Fournier, B.; Thomas, M. D. A. 2006. Preventing ASR/DEF in New Concrete: Final Report, *Austin Center for Transportation Research*, Texas Department of Transportation.
- Fournier, B.; Bérubé, M. A. 1991. Application of the NBRI Accelerated Mortar Bar Test to Siliceous Carbonate Aggregates Produced in the St. Lawrence Lowlands (Quebec, Canada). Part 1: Influence of Various Parameters on the Test Results, *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, pp. 853–862.
- Fournier, B.; Bérubé, M. A. 2000. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications, *Canadian Journals of Civil Engineering*, Vol. 27, pp. 167–191.
- Fournier, B.; Bérubé, M. A.; Folliard, K. J.; Thomas, M. 2010. Report on the Diagnosis, Prognosis, and Mitigation of Alkali-Silica Reaction (ASR) in Transportation Structures, *U.S. Department of Transportation. The Federal Highway Administration*. Technical Report No. FHWA-HIF-09-004.
- Fournier, B.; Bérubé, M. A.; Rogers, C. A. 1999. Proposed guidelines for the prevention of Alkali-aggregate reactivity in new concrete structures, *Transportation Research Record*, No. 1668, Paper No. 99-1176, pp. 48–53.
- Fournier, B.; Bérubé, M. A.; Bergeron, G. 1991. A rapid autoclave mortar bar method to determine the potential Alkali-silica reactivity of St. Lawrence lowlands carbonate aggregates, *Cement and Concrete Research*, Vol. 13(1). pp. 58–71.
- Fournier, B.; Chevrier, R.; DeGrosbois, M.; Lisella, R.; Folliard, K. J.; Ideker, J.; Shehata, M.; Thomas, M. D. A.; Baxter, S. 2004. The accelerated concrete prism test (60 °C): variability of the test method and proposed expansion limits, *12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. pp. 314–323.
- Garcia-Diaz, E.; Riche, J.; Bulteel D.; Vernet, C. 2006. Mechanism of damage for the Alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*. Vol. 36. pp. 395–400.
- Giannini, E. R.; Folliard, K. J. 2013. A Rapid Test to Determine Alkali-Silica Reactivity of Aggregates Using Autoclaved Concrete Prisms, *Portland Cement Association*, SN3235.
- Glasser, F. P. 1992. Chemistry of Alkali-aggregate reaction, *Alkali-Silica Reaction in Concrete* (Ed. R.N. Swamy), Van Nostrand Rheinhold, NewYork: 30 –53.

- Glasser, L. S. D.; Kataoka, N. 1981. The chemistry of Alkali-aggregate reaction, *Proceedings of the 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*. Vol. S252/23. p. 7.
- Grattan-Bellew, P. E. 1997. A Critical Review of Ultra-accelerated Tests for Alkali-silica Reactivity, *Cement and Concrete Composites*. Vol. 19. pp. 402–414.
- Gudmundsson, G.; Olafsson, H. 1999. Alkali-silica reactions and silica fume. 20 years of experience in Iceland, *Cement and Concrete Research*, 29. pp. 1289–1297.
- Gül, R.; Demirboğa, R.; Güvercin, T. 2005. Compressive strength and ultrasound pulse velocity of mineral admixed mortars, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. Vol. 13. pp. 18–24.
- Gumuliauskas, A.; Navickas, A.; Štuopys, A. 1996. Influence of structural state of SiO₂ minerals on aggregate reactivity, *Statyba*. Vol. 2 (7). pp. 46–53.
- Gumuliauskas, A.; Vektaris, B.; Žvironaitė, J. 2002. Alkali-silica reactions in Lithuanian conditions, *Chemical technology*. Vol. 22. pp. 33–39.
- Guneyisi, E.; Gesoglu, M.; Mermerdas K. 2008. Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin, *Materials and Structures*. Vol. 41(5). pp. 937–949.
- Habeeb, G. A.; Fayyadh, M. M. 2009. Rice husk ash concrete: the effect of RHA average particle size on mechanical properties and drying shrinkage, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. Vol. 3(3). pp. 1616–1622.
- Hobbs, D. W. 1988. Alkali-Silica Reaction in Concrete. *Thomas Telford*, London, 183p.
- Hobbs, D. W. 2000. Alkali levels required to induce cracking due to ASR in UK concretes. *Proceedings of the 11th ICAAR*, Québec, Canada, 189–198.
- Hobbs, D. W.; Gutteridge, W. A. 1979. Particle size of aggregate and its influence upon the expansion caused by the Alkali-silica reaction. *Magazine of Concrete research*, 31(109). pp. 235–242.
- Hooton, R. D. 1991. New Aggregate Alkali-Reactivity Test Methods, *Ontario Ministry of Transportation*.
- Hooton, R. D. 1995. Test procedures for ASR, Third Annual ICAR Symposium: *Concrete, bases, and fines*. pp. 1–9.
- Hooton, R. D.; Rogers, C. A. 1993. Development of the NBRI rapid mortar bar test leading to its use in North America, *Construction and Building Materials*. Vol. 7(3). pp. 145–148.
- Huang, C. Y.; Feldman, R. F. 1985. Influence of silica fume on the microstructural development in cement mortars, *Cement and Concrete Research*. Vol. 15. pp. 285–294.
- Ideker, J.; East, B.; Folliard, K. J.; Thomas, M. D. A.; Fournier, B. 2010. The current state of the accelerated concrete prism test, *Cement and Concrete Research*. Vol. 40(4). pp. 550–555.

- Ideker, J. H.; Folliard, K. J.; Fournier, B.; Thomas, M. D. A. 2006. The role of "non-reactive" aggregates in the accelerated (60°C) concrete prism test, *Proceedings from the Marc-André Bérubé Symposium on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete, 8th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology*. pp. 4–70.
- Ingham, J. 2010. *Geomaterials Under the Microscope: A Colour Guide*, London: Manson Publishing Ltd.
- Islam, M. S.; Akhtar, S. 2013. Review: A Critical Assessment to the Performance of Alkali-Silica Reaction (ASR) in Concrete, *Canadian Chemical Transactions*. Vol. 1 (4). pp. 253–266.
- Islam, M. Sh. 2010. Performance of Nevada's aggregates in Alkali-aggregate reactivity of Portland cement concrete. *A dissertation*. Graduate College, University of Nevada, Las Vegas.
- Islam, M. Sh.; Akhtar, S. 2013. A Critical Assessment to the Performance of Alkali-Silica Reaction (ASR) in Concrete, *Canadian Chemical Transactions*, Vol. 1 (4): 253–266.
- Jianyong L.; Yan, Y. 2001. A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete, *Cement and Concrete Research*. Vol. 31(8). pp. 1203–1206.
- Jin, W.; Meyer, C.; Baxter, S. 2000. Glascrete-concrete with glass aggregate. *ACI Materials Journal*, Volume: 97 (2): 208–213.
- Justice, J.; Kennison, L.; Mohr, B. 2005. *Comparison of two metakaolins and a silica fume used as supplementary cementitious materials*, SP-228, ACI, Farmington Hills, Mich, USA.
- Kawabata, Y.; Yamada, K.; Ogawa, S.; Sagawa, Y. 2013. Prediction of ASR expansion of fieldexposed concrete based on accelerated concrete prism test with Alkali-wrapping, *Cement Science and Concrete Technology*. Vol. 69. pp. 449–455.
- Kawamura, M. and Takemoto, K. 1988. Correlation between pore solution composition and Alkali silica expansion in mortars containing various fly ashes and blastfurnance slags, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* (10): 215–223.
- Khan, S. U.; Nuruddin, M. F.; Ayub, T.; Shafiq, N. 2014. Effects of Different Mineral Admixtures on the Properties of Fresh Concrete, *The Scientific World Journal*, Volume 2014, Article ID 986567. p. 11.
- Khatib, J. M.; Hibbert, J. J. 2005. Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin, *Construction and Building Materials*. Vol. 19(6). pp. 460–472.
- Kuroda, T.; Inoue, S.; Yoshino, A.; Nishibayashi, S. 2004. Effects of particle size, grading and content of reactive aggregate on ASR expansion of mortars subjected to autoclave method. *Proceedings 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Beijing, China. pp. 736–743.

Kwon, Y. 2005. A study on the Alkali-aggregate reaction in high-strength concrete with particular respect to the ground granulated blast-furnace slag effect, *Cement and Concrete Research*, 35. pp. 1305–1313.

Latifee, E. R.; Akther, S.; Hasnat, K. 2015. A Critical Review of the Test Methods for Evaluating the ASR Potential of Aggregates, *10th Global Engineering, Science, and Technology Conference*, Dhaka, Bangladesh. ISBN: 978-1-922069-69-6.

Latifee, E. R.; Rangaraju, P. R. 2015. Miniature Concrete Prism Test: Rapid Test Method for Evaluating Alkali-Silica Reactivity of Aggregates, *Materials in Civil Engineering*. Vol. 27(7).

Leemann, A.; Katayama, T.; Fernandes, I.; Broekmans, M. A. T. M. 2015. Types of Alkali-aggregate reactions and the products formed, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*. Vol. 169 (3). pp. 128–135.

Leemann, A.; Lothenbach, B. 2008. The Na₂O-equivalent of cement: A universal parameter to assess the potential Alkaliaggregate reactivity of concrete? *13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Trondheim, Norway. p. 11.

Leming, M. L.; Nguyen, B. Q. 2000. Limits on Alkali content in cement-results from a field study. *Cement, Concrete and Aggregates* (22): 41–47.

LST 1974:2012 „LST EN 206-1 taikymo taisyklės ir papildomieji nacionaliniai reikalavimai“.

Lu, D.; Fournier, B.; Grattan-Bellew, P. E.; Xu, Z.; Tang, M. 2008. Development of a universal accelerated test for Alkali-silica and Alkali-carbonate reactivity of concrete aggregates, *Materials and Structures*. Vol. 41(2). pp. 235–246.

Malvar, L. J.; Lenke, L. R. 2006. Efficiency of fly ash in mitigating Alkali-silica reaction based on chemical composition, *ACI Materials Journal*, 103 (5), 319–326.

Manning, D. G. 1985. Detecting defects and deterioration in highway structures, *National cooperative highway research program synthesis of highway practice* 118.

Massazza, F. 1988. Pozzolana and pozzolanic cements. Lea's *Chemistry of Cement and Concrete*, 4th Edition (Ed. P.C. Hewlett), Elsevier, Oxford. ISBN: 9780080535418.

Mather, B. 1999. How to make concrete that will not suffer deleterious Alkali-silica reactions, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 1277–1280.

Mehta, P. K. 1981. Studies on blended portland cements containing santorin earth, *Cement and Concrete Research*, 11. pp. 507–518.

Mehta, P. K. and Gjorv, O. E. 1982. Properties of portland cement concrete containing fly ash and condensed silica-fume, *Cement and Concrete Research*. Vol. 12(5). pp. 587–595.

Monteiro, P. J. M.; Wang, K.; Sposito, G.; dos Santos, M. C.; de Andrade, W. P. 1997. Influence of mineral admixtures on the Alkali-aggregate reaction, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27 (12). pp. 1899–1909.

Naik, T. R. 2008. Sustainability of concrete Construction, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. Vol. 13. pp. 98–103.

- Naik, T. R.; Singh, S.; Ramme, B. 1998. Mechanical properties and durability of concrete made with blended fly ash, *ACI Materials Journal*. Vol. 95(4). pp. 454–462.
- Naiqian, F.; Hongwei, J.; Enyi, C. 1998. Study on the suppression effect of natural zeolite on expansion of concrete due to Alkali-aggregate reaction, *Magazine of Concrete Research*, 50(1). pp. 17–24.
- Newman, J. B.; Choo, B. S. 2004. *Advanced Concrete Technology: Processes*, vol. 3, Butterworth-Heinemann. ISBN: 9780080490007.
- Newman, J.; Choo, B. S. 2003. *Advanced Concrete Technology 2 – Concrete Properties*: 13/6-13/9. ISBN: 9780750651042.
- Nishibayashi, S.; Kuroda, T.; Inoue, S.; Okawa, Y. 1996. Expansion Characteristics of AAR in Concrete by Autoclave Method, *10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Australia. pp. 370–376.
- Nishibayashi, S.; Yamura, K.; Matsushita, H. 1987. A Rapid Method of Determining the Alkali-Aggregate Reaction in Concrete by Autoclave, *7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Ottawa, ON, Canada. pp. 299–303.
- Nixon, P. J.; Gaze, M. E. 1983. The effectiveness of fly ashes and granulated blast furnace slags in preventing AAR, *Proceedings of 6th International Conference on Alkalies in Concrete* (Eds. G. M. Idorn and S. Rostam), Copenhagen. pp. 61–68.
- Oberholster, R. E. 1987. Results of an international inter-laboratory test program to determine the potential Alkali reactivity of aggregates by the ASTM C227 mortar prism method, *7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. pp. 368–373.
- Oberholster, R. E.; Davies, G. 1986. An accelerated method for testing the potential Alkali reactivity of siliceous aggregates, *Cement and Concrete Research*. Vol. 16(2). pp. 181–189.
- Pala, M.; Ozbay, E.; Oztas, A.; Yuce, M. I. 2007. Appraisal of longterm effects of fly ash and silica fume on compressive strength of concrete by neural networks, *Construction and Building Materials*. Vol. 21(2). pp. 384–394.
- Poole, A. B. 1992. Alkali-silica reactivity mechanisms of gel formation and expansion, *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*. Vol. 104 (1). pp. 782–789.
- Poole, A. B. 1992. Introduction to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, in: R. Swamy (Ed.), *Alkali-Silica Reaction in Concrete*, Blackie and Son, Glasgow, England. ISBN 9780203036631.
- Poon, C. S.; Lam, L.; Kou, S. C.; Wong, Y. L.; Wong, R. 2001. Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes, *Cement and Concrete Research*. Vol. 31(9). pp. 1301–1306.
- Poyet, S.; Sellier, A.; Capra, B.; Foray, G.; Torrenti, J. M.; Cognon, H.; Bourdarot, E. 2007. Chemical modelling of Alkali Silica reaction: Influence of the reactive aggregate size distribution, *Materials and Structures*, Springer Verlag, Vol. 40 (2). pp. 229–239.

- Qian, X.; Li, Z. 2001. The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin, *Cement and Concrete Research*. Vol. 31(11). pp. 1607–1611.
- Ramachandran, V. S. 1997. Alkali-aggregate expansion inhibiting admixtures, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 20, pp. 149–161.
- Ramlochan, T.; Thomas, M.; Gruber, K. A. 2000. The effect of metakaolin on Alkali-silica reaction in concrete, *Cement and Concrete Research*, 30. pp. 339–344.
- Ranc, R.; Debray, L. 1992. Reference test methods and a performance criterion for concrete structures, *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR)*, London. pp. 110–116.
- Ranc, R.; Isabelle, H.; Clément, J. Y.; Sorrentino, D. 1994. Limits of Application of the ASTM C227 Mortar Bar Test. Comparison with Two Other Standards on Alkali-Aggregate Reactivity, *Cement, Concrete, and Aggregates*. Vol. 16(1). pp. 63–72.
- RILEM Recommended Test Method: AAR-3 – Detection of Potential Alkali-Reactivity 38 °C Test Method for Aggregate Combinations Using Concrete Prisms. 2016.
- RILEM. 2016. RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures, Springer Netherlands.
- Rivard, P.; Bérubé, M. A.; Ollivier, J. P. 2007. Decrease of pore solution alkalinity in concrete tested for Alkali-silica reaction, *Materials and Structures*. Vol. 40. pp. 909–921.
- Rivard, P.; Bérubé, M. A.; Ollivier, J. P.; Ballivy, G. 2003. Alkali mass balance during the accelerated concrete prism test for Alkali-aggregate reactivity, *Cement and Concrete Research*. Vol. 33. pp. 1147–1153.
- Rosenberg, A. M.; Gaidis, J. M. 1989. A new mineral admixture for high-strength concrete, *Concrete Int*. Vol. 11(4). pp. 31–36.
- Saouma, V.; Perotti, L. 2006. Constitutive Model for Alkali-Aggregate Reactions, *ACI Materials Journal*. Title no. 103-M22. pp. 194–202.
- Shayan, A.; Quick, G. W.; Lancucki, C. J.; Way, S. J. 1992. Investigation of some greywacke aggregates for Alkali-aggregate reactivity, *9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Vol. 2. pp. 958–978.
- Shayan, A.; Xu, A. 2004. Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1). pp. 81–89.
- Shehata, M. H.; Thomas, M. D. A. 2000. The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to Alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 30. pp. 1063–1072.
- Shi, C.; Shi, Z.; Hu, X.; Zhao, R.; Chong, L. 2015. A review on Alkali-aggregate reactions in alkali-activated mortars/concretes made with Alkali-reactive aggregates, *Materials and Structures*, Vol. 48. pp. 621–628.
- Shon, C. S.; Zollinger, D. G.; Sarkar, S. 2002a. Evaluation of modified ASTM C 1260 accelerated mortar bar test for Alkali-silica reactivity, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1981–1987.

- Siddique, R. 2004. Performance characteristics of high-volume class F fly ash concrete, *Cement and Concrete Research*. Vol. 34(3). pp. 487–493.
- Sims, I.; Poole A. 2017. Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review. *London, UK: Taylor & Francis Group*. 62-66. ISBN: 978-1-138-02756-5 (Hardback).
- Sims, I.; Poole, A. B.; St. John, D. A. 1998. *Concrete Petrography: A Handbook of Techniques*, J. Wiley.
- Skripkiunas, G.; M. Vaiciene, M.; Kicaite A.; Gumuliauskas A. 2014. Damages of concrete structures caused by AAR in Lithuania, Alkali-aggregate reactions (AAR) in concrete. *Workshop proceeding from a Nordic-Baltic miniseminar*. pp. 56–65.
- Smith, A. S.; Dunham, A. C. 1992. Undulatory extinction of quartz in granites and sandstones, TRRL Contractor's Report CR 291, *Transport and Road Research Laboratory*, Crowthorne.
- Sorrentino, D.; Ranc, R.; Cariou, B. 1989. Methodology of an industrial research laboratory to assess the reactivity of aggregates. Focus on reproducibility problems, *8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. pp. 307–312.
- Stanton, T. E. 1940. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, *Proceedings of American Society of Civil Engineering*, Vol. 66 (10), 1781–1811.
- Stark, D. 1978. Alkali-silica reactivity in the rocky mountain region, *Proceedings of 4th International Conference on the Effect of Alkalies in Cement and Concrete*, Purdue University. pp. 235–243.
- Stark, D.; Morgan, B.; Okamoto, P. 1993. Eliminating or minimizing Alkali-silica reactivity. *Strategic Highway Research Program*, National Research Council, Washington DC. p. 266.
- Tamura, H. 1987. A test method on rapid identification of alkali reactivity of aggregates (GBRC rapid method), *7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Ottawa, ON, Canada. pp. 304–308.
- Tang, M.; Han, S.; Zhen, S. 1983. A Rapid Method for Identification of Alkali Reactivity of Aggregate, *Cement and Concrete Research*. Vol. 13. pp. 417–422.
- Thomas, M. 2013. Supplementary Cementing Materials in Concrete. *Handbook 1st Edition*. Boca Raton, FL: CRC Press. ISBN-13:978-1466572980.
- Thomas, M. D. A. 1996. Field studies of fly ash concrete structures containing reactive aggregates. *Magazine of Concrete Research* (48). pp. 265–279.
- Thomas, M. D. A. and Innis, F. A. 1998. Effect of slag on expansion due to Alkali-aggregate reaction in concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 6.
- Thomas, M. D. A.; Fournier, B.; Folliard, K. J. 2013. *Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book*. FHWA-HIF-13-019, Federal Highway Administration. p. 224.
- Thomas, M.; Fournier, B.; Folliard, K.; Shehata, M.; Ideker, J.; Rogers, C. 2005. Performance limits for evaluating supplementary cementing materials using the accelerated

mortar bar test, *Aci Materials Journal* 104(2). PCA R&D Serial No. 2892, Portland Cement Association, Shokie, Illinois, USA. p. 22.

Thomas, M. D. A.; Folliard, K. J.; Fournier, B.; Rivard, P.; Drimalas, T.; Garber, S. 2013. Methods for evaluating and treating ASR affected structures: Results of field application and demonstration projects –Volume II: Details of Field Applications and Analysis, *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration*, FHWA-HIF-14-0002.

Thomas, M. D. A.; Fournier, B.; Folliard, K. J. 2013. *Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book*. Report No. FHWA-HIF-13-019.

Thomas, M. D. A.; Fournier, B.; Folliard, K. J.; Ideker, J. H.; Shehata, M. 2006. Test methods for evaluating preventative measures for controlling expansion due to Alkali-silica reaction in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36. pp. 1842–1856.

Touma, W. E.; Fowler, D. W.; Carrasquillo, R. L. 2001. Alkali-silica reaction in Portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives, *International Center for Aggregates Research*, Texas, USA, Research Report ICAR 301-1f.

Vektaris, B.; Vilkas, V. 2006. Betono tvarumas. Betono sulfatinė ir šarminė korozija, atsparumas šalčiui ir karbonizacijai. *Tyrimai ir prevencinės priemonės. Monografija*. Technologija, Kaunas. ISBN 9955-25-158-1.

Venkatanarayanan, H. K.; Rangaraju, P. R. 2013. Decoupling the effects of chemical composition and fineness of fly ash in mitigating Alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Composites*, 43. pp. 54–68.

Oyan, V.; Özvan, A.; Tapan, M. 2013. Effectiveness of Pumice And Scoria Aggregates in Controlling Alkali Silica Reaction, *Ninth International Concrete Conference and Exhibition for Sustainable Construction*. pp. 1–7.

Wang, H.; Gillot, J. E. 1991. Mechanism of Alkali-silica reaction and significance of calcium hydroxide, *Cement and Concrete Research*. Vol. 21. pp. 647–654.

Wigum, B.; French, W.; Howarth, R.; Hills, C. 1997. Accelerated Tests for Assessing the Potential Exhibited by Concrete Aggregates for Alkali-aggregate Reaction, *Cement and Concrete Composites*. Vol. 19. pp. 451–476.

Wright, J. R.; Shafaatian, S.; Rajabipour, F. 2014. Reliability of chemical index model in determining fly ash effectiveness against Alkali-silica reaction induced by highly reactive glass aggregates, *Construction and Building Materials*, 64. pp. 166–171.

Xu, Z.; Shen, Y.; Lu, D. 1998. *Main parameters in the new test method for Alkali-silica reactivity*, J. Nanjing Univesity of Chemical Technology.

Zhang, M. H.; Malhotra, V. M. 1995. Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete, *Cement and Concrete Research*. Vol. 25(8). pp. 1713–1725.

Zhanga, C.; Wanga, A.; Tangb, M.; Wuc, B.; Zhangd, N. 1999. Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion, *Cement and Concrete Research*. 29. pp. 1393–1396.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Rutkauskas, A.; Nagrockienė, D.; Skripkiūnas, G.; Barkauskas, K. 2017a. Determining reactivity level of granite aggregate for concrete, *Construction science: scientific journal of RTU*. Vol. 20: 33–37. ISSN 1407-7329.

Rutkauskas, A.; Nagrockienė, D.; Skripkiūnas, G.; Kičaitė, A.; Girskas, G. 2017b. Identification of reactivity level in aggregates from Lithuanian gravel quarry, *Construction science: scientific journal of RTU*. Vol. 20: 54–59. ISSN 1407-7329.

Rutkauskas, A.; Girskas, G. 2015. Lietuvos karjerų užpildų poveikio betono šarminiai korozijai tyrimai. *Mokslas – Lietuvos ateitis: statyba, transportas, aviacinės technologijos*. Vol. 7 No 5: 551–556. ISSN 2029-2341.

Straipsniai kituose leidiniuose

Rutkauskas, A.; Nagrockienė, D.; Skripkiūnas, G. 2017c. Cement type influence on Alkali-silica reaction in concrete with crushed gravel aggregate, *3rd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (IMST 2017)*. Vol. 251: 1–8. ISSN 1757-8981.

Rutkauskas, A.; Nagrockienė, D.; Girskas, G. 2016. Smėlio ir žvirgždo iš Lietuvos karjerų reaktyvumo lygio nustatymas, *19-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminė konferencija. Statyba*, p. 1–7. ISBN 9786094579486.

Rutkauskas, A.; Nagrockienė, D. 2015. Užpildų reaktyvumo tyrimai iš Lietuvos žvyro karjerų. *18-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminė konferencija. Statyba*, p. 1–9. ISBN 9786094578212.

Summary in English

Introduction

Problem formulation

Reactivity tests with aggregates show that all aggregates contain reactive rock impurities. Therefore, preventive measures must be taken to avoid the deleterious Alkali-silica reaction in concretes made with aggregates.

The use of active mineral admixtures such as fly ash, blast furnace slag, silica fume and natural zeolite in the manufacture of concrete increases the resistance to alkaline reaction, but it is important to evaluate the level of contamination of aggregates, and take this into account while select mineral admixtures and their limit values, to determine the impact of admixtures on the structure and properties of material and its resistance to alkaline reaction.

Alkali-silica reaction (hereinafter ASR) in concrete is one of the most common types of chemical concrete reaction and one of the most dangerous phenomena that can cause cracking of concrete structures, surface pop-outs, concrete breakage. Therefore, it is very important to find effective ASR reduction measures and to produce concrete resistant to alkali reaction using reactive aggregates.

Relevance of the thesis

The effect of ASR on the structures is different in each region of the world or even in different countries. It depends on the climate, on properties of local raw materials and

characteristics of other components of concrete. For this reason, ASR tests are mainly performed in order to evaluate the conditions of a specific region.

When it is not possible to avoid aggregates contaminated with reactive particles for concrete manufacturing, the amounts of mineral admixtures must be selected carefully and in proportion to the concentration of SiO_2 , which ensure the durability, strength and resistance to ASR of concrete or reinforced concrete structures in adverse conditions: relatively high concentration of alkali in concrete pore solution; critical contamination of aggregates; increased water content.

The results of the research will be used in designing ASR resistant reinforced concrete structures and production of concrete with enhanced resistance to ASR basing on the tests of the effect of mineral admixtures on ASR in concrete containing aggregates contaminated with reactive particles.

Research object

The object of research is enhanced ASR resistant concrete modified with mineral admixtures: fly ash, blast furnace slag, silicon dioxide microfume and natural zeolites.

Aim of the thesis

To investigate the effect of mineral admixtures on the ASR in concrete containing aggregates contaminated with reactive particles.

Objectives of the thesis

The following objectives were set to reach the aim:

1. In respect of ASR, to evaluate the effect of composite cements in on concrete with local reactive aggregates.
2. To analyze the effect of active mineral admixtures on the properties in concrete and determine the dependence between their amount, the change in speed and expansion of the ultrasound pulse with aggregates contaminated with reactive particles.
3. To evaluate the effect of ASR process on the structure and properties of concrete extending the duration of the research from 14 to 56 days.
4. To provide recommendations to determine and reduce ASR using mineral admixtures.

Research methodology

The contamination of aggregates with reactive rocks is determined in accordance with standard LST 1974:2015 M annex "Methodology for determining the contamination of aggregates with reactive rocks and resulting deformations".

Properties of concrete were tested by standardized test methods meant to measure density, compressive and flexural strength, ultrasonic pulse velocity and water absorption.

The resistance of concrete specimens to ASR was tested in accordance with the standardized methodology "RILEM AAR-2". According to this method, the tested specimens are kept in 1N NaOH solution of 80°C for 56 days and their expansion is regularly measured.

The structures of concrete modified with mineral admixture was tested by the scanning electron microscopy (SEM) and X-ray analysis methods.

Scientific novelty of the thesis

The following new findings important for the materials engineering science were obtained in this research:

1. The effect of mineral admixtures and their amount in concrete mix on the expansion of concrete was determined. This knowledge makes it possible allows to increase ASR resistance of concrete containing aggregates contaminated with reactive particles.
2. "RILEM AAR-2" research methodology was revised. It was determined that 14 test days are insufficient to evaluate the expansion of concrete with different mineral admixtures, since the expansion of up to 14 test days changes with linear dependence, and the continuation of the research up to 56 days causes changes in curve characteristics depending on the mineral admixture used and its amount.
3. New scientific knowledge of material engineering obtained makes it possible to evaluate the expansion of concrete, which can be determined from the amount of mineral admixtures and the change in ultrasonic pulse velocity.

Practical value of the research findings

The findings of this research can be applied in developing ASR normative documents.

Determined dependency between the amount of fly ash mineral additive in the concrete mixture, the change in the rate of ultrasonic pulse velocity and expansion by the influence of the alkaline environment on the samples.

The modified "RILEM AAR-2" research method specifies concrete resistance to alkaline corrosion more precisely.

Defended statements

1. ASR caused expansion of modified concrete containing reactive aggregates depends on the content of SiO_2 in mineral admixtures.
2. The addition of mineral admixtures changes the microstructure of the contact zone of the reactive aggregate and hardened cement paste, and the amount of the reaction product (alkaline gel) is reduced.
3. The relationship between the change of ultrasonic pulse velocity, the amount of mineral admixtures and onset of the expansion makes it possible to evaluate the

effect of ASR on concrete containing aggregates contaminated with reactive particles and mineral admixtures.

Approval of the research findings

6 articles have been published on the topic of this doctoral thesis: three articles in international database publications (Rutkauskas *et al.* 2015; Rutkauskas *et al.* 2017a; Rutkauskas *et al.* 2017b); one article in conference proceedings included in Clarivate Analytics Web of Science Conference Proceedings database publications (Rutkauskas *et al.* 2017c); two articles in conference proceedings (Rutkauskas *et al.* 2015; Rutkauskas *et al.* 2016)

The results of the tests conducted during in doctoral thesis related research were announced in five scientific conferences in Lithuania and abroad:

- the 3rd international conference *Innovative Materials, Structures and Technologies* (IMST 2017) in Riga in 2017;
- the 20th conference of young Lithuanian researchers *Mokslas – Lietuvos ateitis* (Science –the future of Lithuania) in Vilnius in 2017;
- The 12th international conference *Modern Building Materials, Structures and Techniques* in Vilnius in 2016;
- the the 19th conference of young Lithuanian researchers *Mokslas – Lietuvos ateitis* in Vilnius in 2016;
- The 19th conference of young Lithuanian researchers *Mokslas – Lietuvos ateitis* in Vilnius in 2016.

Structure of the thesis

The thesis consists of the introduction, three chapters, general conclusions, reference list, the list of author's publications on the topic of the thesis, a summary in English and seven annexes.

The length of the thesis is 127 pages excluding annexes, there are 7 numbered equations, 61 figures and 9 tables. 151 literature sources were used for this thesis.

1. The analysis of the properties of mineral admixtures and Alkali-silica reaction resistance of modified concretes

In the present day, concrete is the most widely-used construction material in the world (Naik 2008). Concrete is made of aggregates, water and a binding material (cement or other cementitious materials). The reactions between aggregates and binding agents are extremely complex. Many natural aggregates contain a quantity of amorphous silica and carbonate, which both react with the alkalis (Na and K) of the mixture. The alkali in concrete mix mainly comes from cementitious materials). This interaction is widely known as the Alkali-aggregate reaction (hereinafter AAR). Depending on the reacting mineral AARs classified as Alkali-silica reactions (hereinafter ASR) Alkali-carbonate reactions (hereinafter ACR). ASR is caused by the aggregates containing reactive silica minerals. ACR develops due to the composition of aggregates. ASR is a common form of AAR while ACR is very rare (Ingham 2010).

Alkali-silica reaction is one of the most deleterious reactions in concrete. It causes the expansion of concrete, development of cracks, deteriorated mechanical properties of concrete and jeopardizes concrete application (Islam 2013).

AAR can cause destructive expansion, which is affected by many factors, such as the nature and dosage of activators, binders, reactive aggregates, testing methods. All factors should be considered at the same time to understand the behavior of the materials studied (Shi *et al.* 2015).

The type, amount, mineral composition and particle size distribution of reactive aggregates have effects on AAR (Shi *et al.* 2015).

Alkali-silica reaction in concrete can be avoided by using non-reactive aggregates. However, a concrete producer often has no access to such aggregates either due to regional unavailability or financial reasons. Another method – is to reduce the alkalinity of the pore solution in concrete to a level where no deleterious AAR occurs with the aggregate used. This can be achieved by the use of suitable mineral admixtures mitigating the possibility of AAR (Kawamura and Takemoto 1988, Duchesne and Bérubé 1994, Thomas 1996, Ferraris *et al.* 2000) or the use of cement with low Na₂O-equivalent (Hobbs 2000, Leming and Nguyen 2000).

A reactive aggregate is mainly responsible for supplying the silica or silicate that is needed to form ASR in concrete. Subsequently, the silica reacts with the alkali-hydroxides (sodium and/or potassium) in concrete to form ASR gel (Islam 2010).

The type, amount, mineral composition and particle size distribution of reactive aggregates have effects on AAR (Shi *et al.* 2015). Although it is possible to determine what types of aggregates have a trend toward AAR, it is impossible to predict whether their use will result in excessive expansion or not. It has been found that a critical amount exists for each type of aggregate, which can result in serious expansion of concrete and an amount smaller or larger than this value will not cause significant swelling (Zhang *et al.* 1999).

Sand, gravel and crushed stone are the most commonly used aggregates for concrete manufacturing in Lithuania. Opoka particles, which contain silicate rocks, and spongy flint, which contains various carbonates and silicates are found in all gravel quarries (Gumuliauskas *et al.* 2002). Thus, all fine and coarse aggregates from Lithuanian quarries are contaminated with reactive opoka and flint, which react intensively with sodium and potassium alkali present in the cement. Opoka is twice more reactive than flint (Skripkiūnas *et al.* 2014).

2. Overview of research into the raw materials and Alkali-silica reaction in concrete

Four mineral admixtures were used in the tests: SiO₂ fume (a liquid suspension of amorphous silica dioxide fume), natural zeolite, blast furnace slag and fly ash.

Cements without mineral admixtures CEM I 42.5 R and low alkaline cement CEM I 42.5 N-SR were used in the research. Composite cements containing 20% of mineral admixtures were also used: slag cement CEM II/A-S 42.5 N and cement with fly ash CEM II/A-V 52.5 N. The cements used comply with EN 1974-1 standard requirements.

0/4 fraction sand and gravel of different fractions from gravel quarries were used for the tests.

Concrete mix compositions with the same water and bonding ratio (W/R) of 0.47 were designed following the recommendations of producers and suppliers on the use of mineral admixtures in cement mixes and "RILEM AAR-2" research methodology. The flowability of concrete mixes according to "RILEM AAR-2" test methodology must range between 205 and 220mm. Superplasticizer was used to achieve the same flowability of the concrete mix.

Dry materials were used to prepare hardened cement paste specimens. Cement and zeolite admixtures were dosed by weight, water and chemical agents were dosed by volume. Concrete mixtures were mixed in a forced action mixer, the mixing duration was 2 minutes. Concrete mixes of different compositions modified with different amounts of mineral admixtures of four types added by weight of cement were mixed.

The chemical analysis of mineral admixtures was done by the X-ray fluorescence spectrometer Bruker X-ray S8 Tiger WD. Phase analysis of mineral admixtures was done by X-ray diffraction meter SmartLab (Rigaku) with a rotating Cu anode X-ray generator.

The fineness of materials was measured by applying the air permeability method (Blaine method) in accordance with LST EN 196-6:2010. The microstructure of concrete specimens and mineral admixtures was tested with the scanning electron microscopy (SEM) device SEM JEOL JSM-7600F. The particle size distribution of natural zeolite and fly ash was measured with the laser particle size analyzer Cilas 1090 LD. The particle size distribution of blast furnace slag was measured with the digital sieve shaker Haver EML 200. The ultrasonic pulse velocity was measured with the instrument Pundit 7 (transducer frequency 54 kHz) and the time taken by ultrasonic wave pulse to get through the structure was calculated. The main physical and mechanical characteristics of hardened specimens were determined in accordance with LST EN 12390.

The contamination of aggregates with reactive rocks is determined in accordance with standard LST 1974:2015 M annex "Methodology for determining the contamination of aggregates with reactive rocks and resulting deformations".

The expansion of concreted specimens was tested according to RILEM recommended test method AAR-2. According to "RILEM AAR-2" method the specimens (40×40×160 mm) hardened in water of 80°C temperature was kept for 14 days in 1N NaOH solution at 80°C temperature and afterwards their expansion is measured. The methodology prescribes a longer conditioning time for specimens with aggregates containing slowly reactive rocks. In our case the time of soaking specimens in 1N NaOH solution was extended to 56 days.

3. Research of the structure, characteristics and Alkali-silica reaction in concrete modified with mineral admixtures

The test result revealed (Fig. S3.1) that the sands from the tested quarries are contaminated with reactive particles more than the gravel from the same quarries. The lowest contamination of sand, and also of gravel, was observed in the third quarry (3.28%). The contamination in the first quarry was 3.45%, whereas the fourth quarry was contaminated the most with reactive particles causing ASR in concrete. The contamination of sand from the fourth quarry reached 3.58% (Fig. S3.1).

The difference between the contaminations of sand from the tested quarries was insignificant, therefore the sands, like the gravels, are considered to be contaminated with reactive rocks.

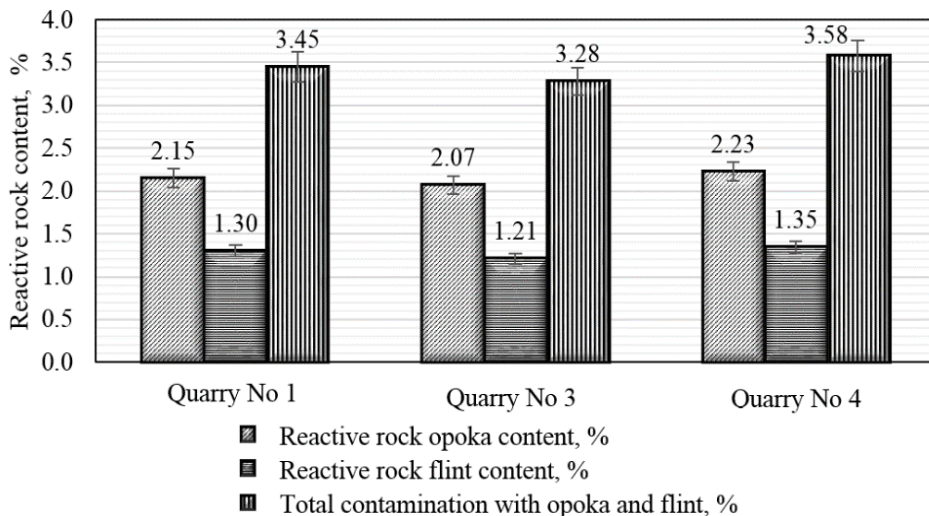


Fig. S3.1. Contamination test results of sand with reactive particles

The effect of sand on ASR in concrete was found to be higher compared to gravel. This higher effect depends on the particle size; smaller particles react much faster and cause greater ASR – related damage compared to coarser aggregates.

Basing on the findings of the contamination of aggregates with reactive particles and ASR tests, the most contaminated (the most reactive) aggregate, i.e. the sand from the fourth quarry was selected for further tests. The total contamination of this sand with reactive particles was 3.58% (1.35% of reactive flint and 2.23% of reactive opoka). The expansion of the specimens with this sand was 0.113%.

ASR tests according to “RILEM AAR-2” test method were conducted with specimens made of CEM I 42.5 N-SR, CEM I 42.5 R, CEM II A-V 52.5N, and CEM II/A-S 42.5 N cements with the most reactive sand from the fourth quarry. The obtained results are presented in Fig. S3.2.

After 56 days of conditioning at 80°C temperature in 1N NaOH solution the expansion of concrete with the most reactive sand and cement CEM I 42.5 R without mineral admixtures was 0.113%. Lower expansion of 0.108% was observed in specimens with slag cement CEM II/A-S 42.5 N. The expansion of specimens made of low alkaline cement CEM I 42.5 N-SR was 0.107%. The lowest expansion was observed in concrete modified with fly ash and made of cement CEM II A-V 52.5N. After 56 days of conditioning at 80°C temperature in 1N NaOH solution the expansion of specimens was 0.105%.

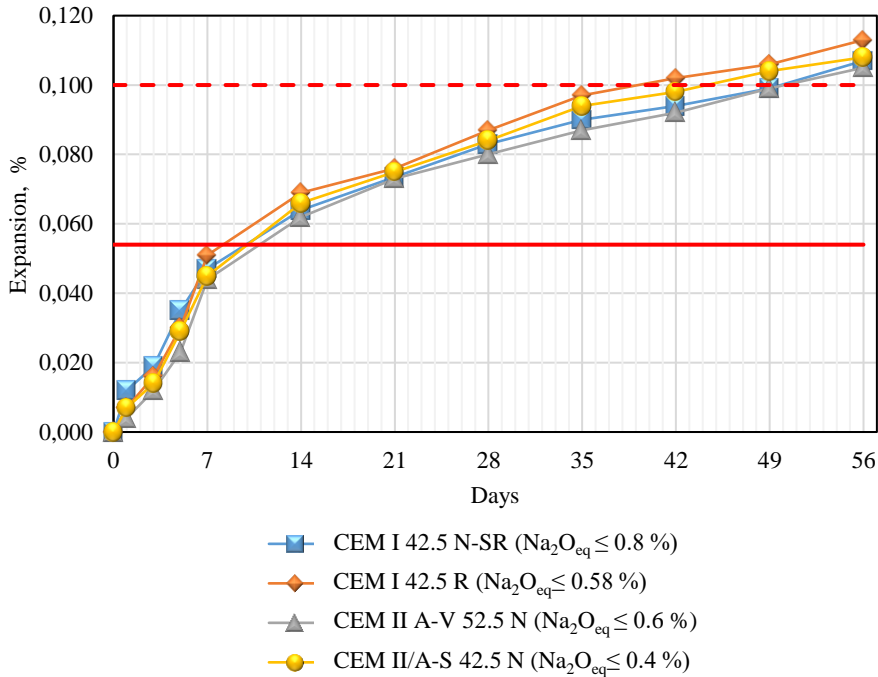


Fig. S3.2. The expansion values of specimens made of different cements with sand after 56 days of conditioning at 80°C temperature in 1N NaOH solution

Cement CEM I 42.5 R without mineral admixtures was selected for further tests in order to clearly see the effect of active mineral admixtures on ASR in concrete.

Limit values of mineral admixtures added by weight of cement and leading to the highest densities and compressive strengths of concrete specimens were found through the tests of physical and mechanical properties of concrete. The average density of control specimens without mineral admixtures was 2031 kg/m³ and the compressive strength was 52.08 MPa. The density of specimens modified with 55% of blast furnace slag was 2171 kg/m³, and the highest compressive strength of 57.13 MPa was achieved when the mineral admixture was added at 45% by weight of cement. The highest density of 2183 kg/m³ was achieved by replacing 55% of cement with fly ash. The compressive strength of 57.46 MPa was recorded in specimens containing 35% of fly ash. 10% was the most optimal amount of silica fume leading to the highest density of 2131 kg/m³ and compressive strength of 59.06 MPa. The highest density of 2145 kg/m³ was achieved with 10% of mineral admixture, and 12.5% of natural zeolite produced a compressive strength of 56.41 MPa.

The expansion results of concrete specimens containing mineral admixtures of fly ash, blast furnace slag, silica fume, and natural zeolites and conditioned in 1N NaOH solution of 80°C temperature for 14 and 56 days are presented in Fig. S3.3 and Fig. S3.4.

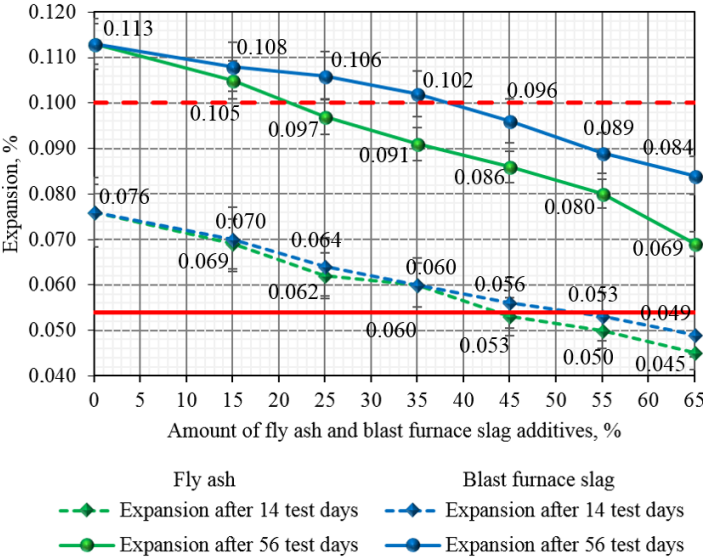


Fig. S3.3. The relationship between the expansions of concrete specimens conditioned in 1N NaOH solution of 80°C temperature for 56 days and the amount of mineral admixtures

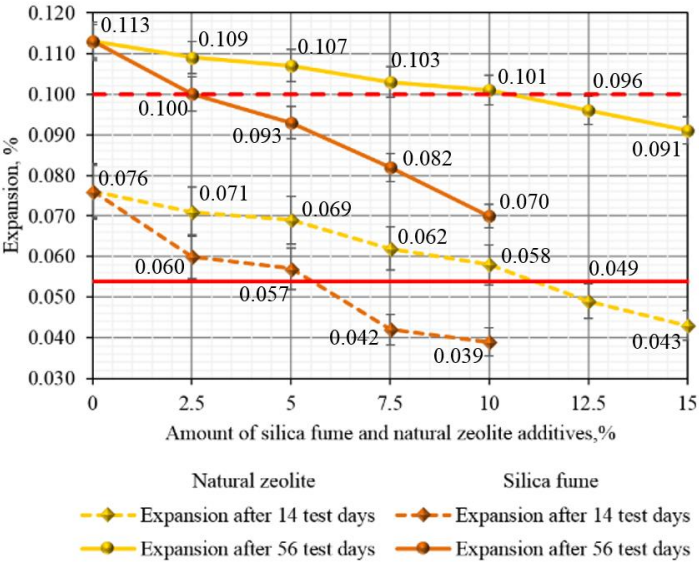


Fig. S3.4. The relationship between the expansions of concrete specimens conditioned in 1N NaOH solution of 80°C temperature for 56 days and the amount of mineral admixtures

ASR tests revealed the following limit values of mineral admixtures that prevent the expansion of specimens conditioned in 1N NaOH solution of 80°C temperature for 14 and 56 days from exceeding the limits of 0.054% and 0.1%:

- 45% of fly ash;
- 55% of blast furnace slag;
- 7.5% of silica fume;
- 12.5% of natural zeolite.

Tests with different mineral admixtures revealed that the absolutely lowest expansion of concrete was obtained when fly ash was used to replace 65% of the binding material CEM I 42.5 R. Fly ash was found to have the biggest positive effect on concrete with reactive aggregates in ASR favorable environment.

The change in ultrasonic pulse velocity (UPV) measured after the expansion tests is presented in Fig. S3.5. The highest change after expansion tests was observed in control specimens without any mineral admixtures. The UPV in these specimens reduced from 4244 m/s and 3891 m/s, i. e. the change of 8.32%. In specimens of concrete modified with natural zeolite the ultrasonic pulse velocity reduced 6.71% from 4265 m/s to 3979 m/s. In specimens of concrete modified with 55% of blast furnace slag the UPV reduced 5.18% from 4283 m/s to 4061 m/s. A 3.63% drop in UPV was observed in specimens modified with 7.5% silica fume. The comparative tests revealed that the lowest change in UPV values was recorded in specimens containing 45% of fly ash. The UPV in these specimens reduced from 4291 m/s and 4158 m/s, i. e. the change was 3.1%.

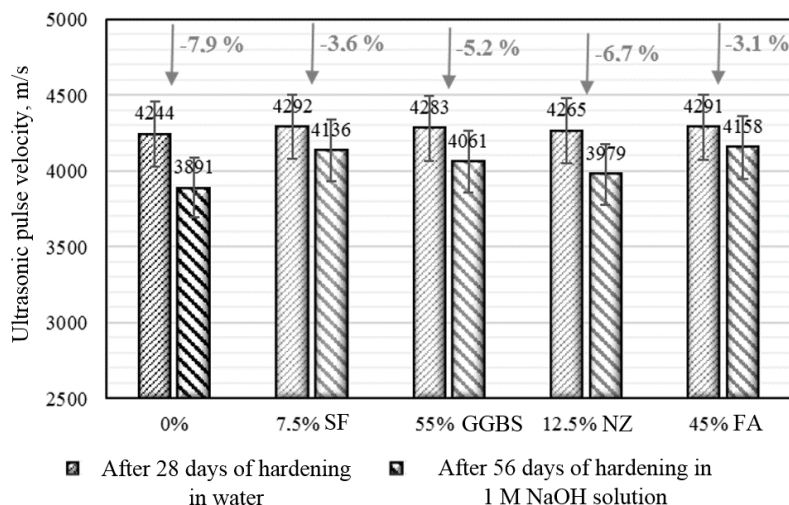


Fig. S3.5. Ultrasonic pulse velocity changes in specimens conditioned in 1N NaOH solution of 80°C temperature for 56 days

Control specimens were tested with a scanning electron microscope (SEM). Fig. S3.6 illustrates the microstructure of concrete without mineral admixtures. Layers of alkaline gel are visible around the aggregate. They absorbed water and started expanding thus causing the development of cracks in the cement matrix. A gap is visible between the aggregate

and the gel, a product of alkaline silicate reaction. The gel image magnified 5 000 and 10 000 times reveals the microstructure of the gel, which deteriorates the physical and mechanical properties of hardened concrete and causes surface cracking, scaling and chipping.

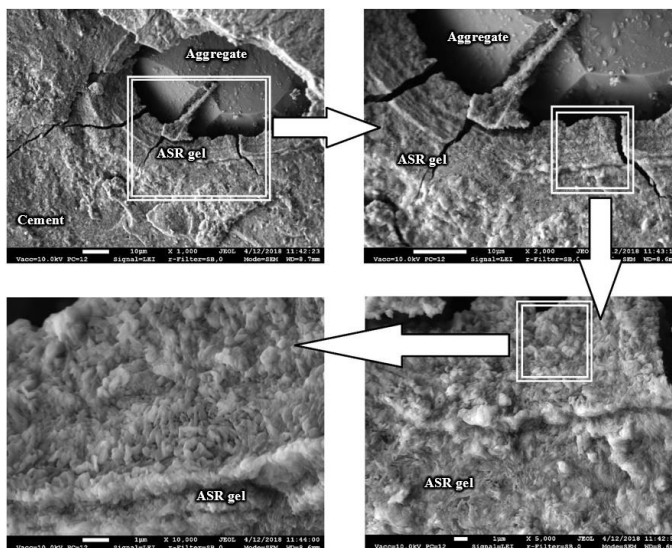


Fig. S3.6. Microstructure of the control specimen conditioned in 1N NaOH solution of 80°C temperature for 56 days

Figure S3.7 illustrates the SEM images of the microstructure of specimens containing 45% of fly ash conditioned in 1N NaOH solution of 80°C temperature for 56 days. The contact zone between the aggregate and the binding material was found to be much stronger. There are less gaps or even no gaps at all compared to the control specimen without mineral admixtures. The cracks in the cement matrix are present, but insignificant. The accumulation of alkaline gel is presents, however the structure of the gel is less massive than in the control specimen and the presence of the gel is less significant, no layers of ASR products are clearly visible.

Figure S3.8 illustrates the change of UPV in concrete modified with fly ash admixture after conditioning the specimens in 1N NaOH solution of 80°C temperature for 56 days.

A drop of UPV was observed in all specimens conditioned in 1N NaOH solution of 80°C temperature for 56 days, however the change is different depending on the amount of fly ash. The change in specimens without mineral admixtures was 8.3%, whereas in specimens modified with 45% of fly ash the change of UPV dropped to 3.1%. In specimens with the maximum 65% content of the admixture the change was only 2%. The change of UPV in specimens cured in water for 28 days and after expansion tests by conditioning the specimens in 1N NaOH solution of 80°C temperature for 56 days is directly related to the amount of the mineral admixture in concrete mix.

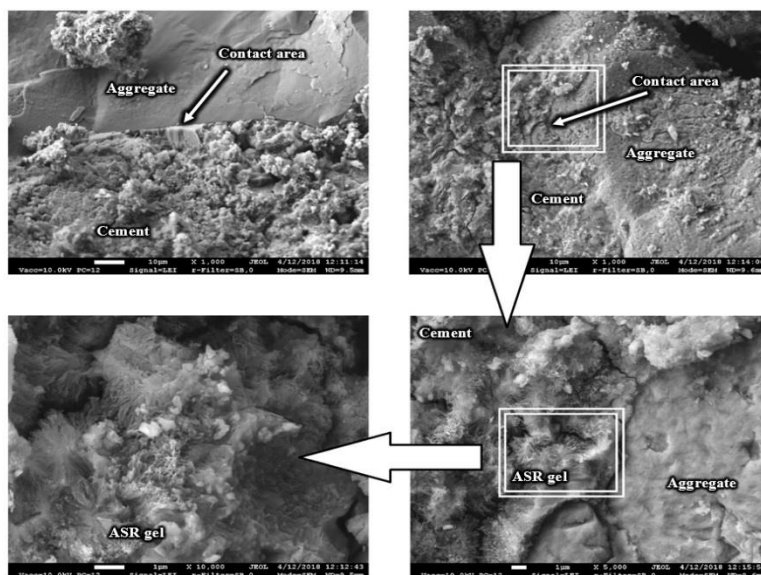


Fig. S3.7. Microstructure of concrete modified with 45% of fly ash conditioned in 1N NaOH solution of 80°C temperature for 56 days

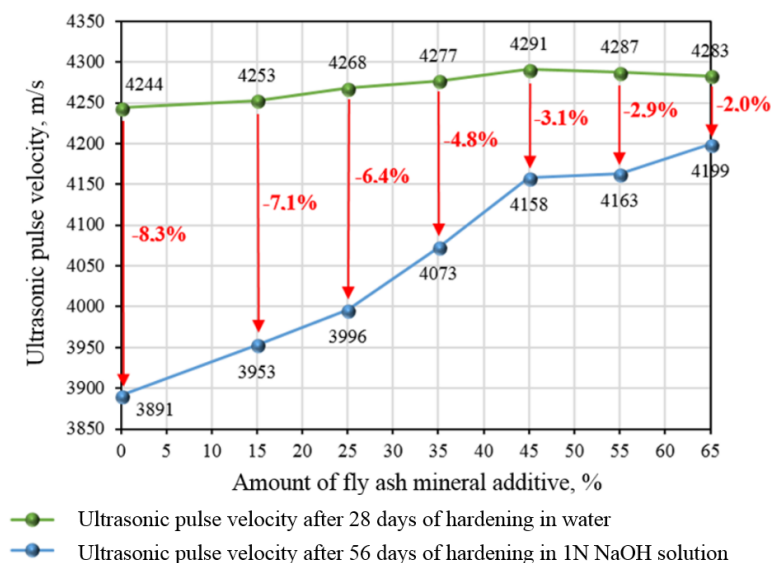


Fig. S3.8. Relationship between the change of ultrasonic pulse velocity and fly ash content

The relationship between the content of fly ash (FA), the change of ultrasonic pulse velocity in specimens cured in water for 28 days and conditioned in 1N NaOH solution of 80°C temperature for 56 days (ΔV_{UG}) and the expansion of specimens after conditioning

in 1N NaOH solution of 80°C temperature for 56 days (Fig. S3.9) was determined basing on the previous experimental tests in order to evaluate the effect of fly ash on the expansion of concrete.

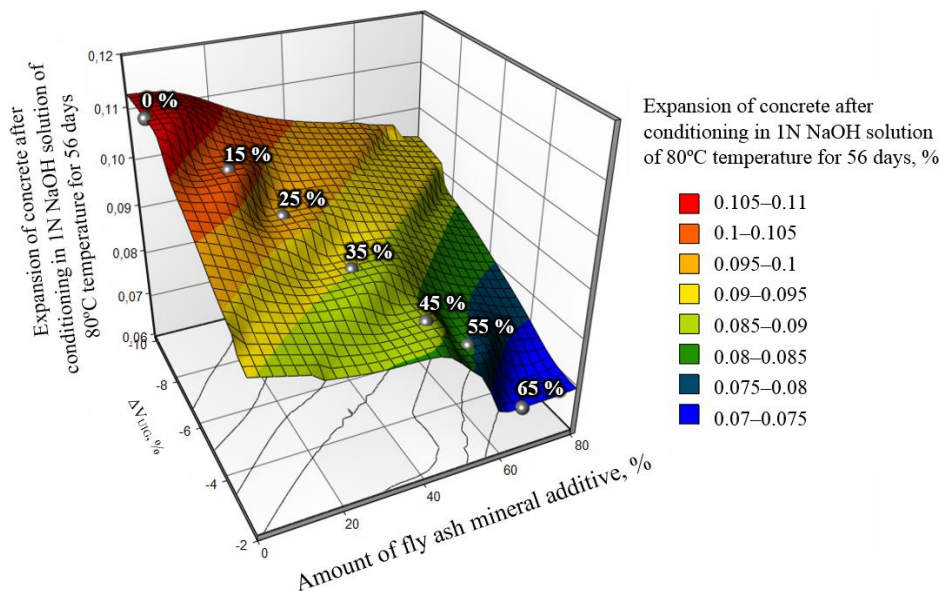


Fig. S3.9. Relationship between the expansion of concrete after conditioning in 1N NaOH solution of 80°C temperature for 56 days, the amount of fly ash and the change in ultrasonic pulse velocity

ASR tests have to be done in order to evaluate whether the designed concrete mix meets the durability requirements for structures used in ASR favorable environment. A research method leading to the exact evaluation of the resistance of concrete to ASR must be selected to this end.

Extended ASR tests must be conducted in the preparation of concrete mixes with reactive aggregates contaminated with fast reactive opoka and slowly reactive flint rocks.

ASR tests conducted for this research revealed the ASR process does not stop when specimens are conditioned in 1N NaOH solution of 80°C temperature for 14 days according to “RILEM AAR-2” test method. The testing time must be extended for as much as possible higher amount of fast reactive and slowly reactive rocks to react.

Basing on the tests conducted in this research we recommend to extend concrete expansion tests up to 56 days and evaluate the expansion after 14 and 56 days. These expansions may not exceed 0.054% and 0.1%. If the above limits are not exceeded, the designed concrete is considered to be ASR resistant.

General conclusions

1. Aggregate reactivity studies have shown that the aggregates are contaminated of reactive particles with an average amount in sand is 3.44%, and gravel – 3.24%.

The use of such aggregates in concrete requires the preventive measures of Alkali-silica reaction.

2. Using composite Portland cement (CEM II/A-S 42.5 N and CEM II/A-V 52.5 N) containing up to 20% of mineral additives ASR resistance in concrete is not guaranteed. After 56 test days at 80°C in 1N NaOH solution, expansion with different type of cement exceeded the critical permissible limit of 0.1%: the expansion of concrete with slag Portland cement was 0.108% and the expansion of concrete with ash Portland cement – 0.105%. Concrete expansion of control samples with cement without mineral additives – 0.113%.
3. After conducting research on concrete properties of water absorption, density, ultrasonic pulse velocity, compressive and flexural strength after 28 days of hardening in water (superplasticizer was used for the uniformity in the movement of concrete mixtures) the limit values for mineral additives in concrete were determined and evaluated in a complex: 10% of silicon dioxide microfume, 10% of natural zeolite, 45% of blast furnace slag and 35% of fly ash additive. Increasing the amount of mineral additives in concrete density, ultrasonic pulse velocity, compressive and flexural strength begin to deteriorate, which is explained by overdose of mineral additives.
4. The limit values of mineral additives (substituting a part of a binder in concrete mixture) that do not allow the expansion of samples to exceed 0.054% and 0.1% after 14 and 56 test days: 45% of fly ash, expansion – 0.086%; 55% of blast furnace slag, expansion – 0.089%; 7.5% of silicon dioxide microfume, expansion – 0.1%; 12.5% of natural zeolite, expansion – 0.096%.
5. Amount of SiO_2 in composition of active minerals additives binds NaOH and KOH alkali contained in the cement before their reaction with SiO_2 in concrete aggregates. The results of scanning electronic microscopy research show that the active mineral additives in concrete mixture react with NaOH and KOH alkali in the cement much faster than contaminated aggregates. This reduces the amount of alkaline gel in the contact area of the aggregates and the binder material.
6. The dependence between the amount of fly ash mineral additive in the concrete mixture, the change in the rate of ultrasonic pulse velocity and expansion, which determine the effect of Alkali-silica reaction in concrete have been obtained. The change in the velocity of the ultrasound pulse in the samples occurs due to micro-cracks caused by expansion that form an obstacle to propagate ultrasound waves in the material. Modification of concrete with mineral additive from 0% to 65% decreases the change in ultrasonic pulse velocity from 8.3% to 2%.

Priedai³

A priedas. Cementų fizikinės ir mechaninės savybės

B priedas. Skystos amorfinio silicio dioksido mikrodulkių suspensijos savybės

C priedas. Užpildų dalelių ir piltiniai tankiai

D priedas. Superplastiklio charakteristikos

E priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija

F priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijoje skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

G priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Aurimas RUTKAUSKAS

MINERALINIŲ PRIEDŲ POVEIKIS
BETONO ATSPARUMUI ŠARMINEI KOROZIJAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Medžiagų inžinerija (08T)

INFLUENCE OF MINERAL ADDITIVES
ON THE RESISTANCE OF CONCRETE
TO ALKALI-SILICA REACTION

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Materials Engineering (08T)

2018 11 13. 13,0. sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „BMK leidykla“,
A. Mickevičiaus g. 5, LT-08119 Vilnius